ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : Προώθηση κίνησης (relaying) από ενδιάμεσες συσκευές για τη βελτίωση της απόδοσης ασύρματων τοπικών δικτύων

ΣΑΡΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Α.Μ: 12506)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας ασύρματων τοπικών δικτύων IEEE 802.11 (WiFi) είναι η λειτουργία με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης. Δύο συσκευές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μπορεί να επικοινωνούν με πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, λόγω της εξασθένησης και των σφαλμάτων στο ασύρματο μέσο. Αν η επικοινωνία τους όμως, γίνει μέσω μιας ενδιάμεσης συσκευής, η οποία έχει μικρότερη απόσταση από τις δύο συσκευές και άρα επικοινωνεί με αυτές με μεγαλύτερη ταχύτητα, μπορεί να βελτιωθεί τόσο η συνολική απόδοση του δικτύου όσο και οι επί μέρους ρυθμοί διεκπεραίωσης όλων των συσκευών.

Η φιλοσοφία μιας τέτοιου είδους επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών σε ένα δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας, βασίζεται στην συνεργασία των συσκευών, μια έννοια που έχει αρχίσει να απασχολεί ιδιαίτερα τόσο τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και τη βιομηχανία, καθώς μπορεί να αποδειχθεί αποτελεσματική στην αντιμετώπιση των περιορισμών απόδοσης των ασύρματων δικτύων που οφείλονται στην κινητικότητα των χρηστών αλλά και στην έλλειψη των πόρων του δικτύου. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, τα ασύρματα συστήματα τείνουν να είναι εξαιρετικά ετερογενή, γεγονός που προσδίδει ένα ιδιαίτερα πρόσφορο έδαφος στην εφαρμογή της προώθησης κίνησης (relaying) μέσω της συνεργασίας των συσκευών στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs). Μια τέτοιου είδους προώθηση κίνησης εστιάζεται κυρίως στον σχεδιασμό του Medium Access Control (MAC) layer, στην ανάλυση και στις προκλήσεις των WLANs αλλά και στον τρόπο σχεδιασμού ενός δικτύου συνεργασίας των συσκευών για εξαιρετικά δυναμικά δίκτυα που μπορούν να περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό κινούμενων κόμβων.

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη των οφελών της προώθησης κίνησης από ενδιάμεσες συσκευές στη συνολική απόδοση αλλά και στον ρυθμό διεκπεραίωσης της κάθε συσκευής, καθώς επίσης και η ανάπτυξη και αξιολόγηση διαδικασιών για να αποφασίσει μια συσκευή πότε θα πρέπει να προωθήσει πακέτα άλλης συσκευής που έχουν χαμηλό ρυθμό μετάδοσης.

SUMMARY

Basic characteristic of technology of wireless local networks IEEE 802.11 (WiFi) is the operation with different rythms of transmission. Two appliances that are found in big distance can they communicate with very low rythm of transmission, because the decrepitude and the faults in the wireless means. If their communication however, becomes via a intermediary appliance, which has smaller distance than the two appliances and hence it communicates with them with bigger speed, can are improved so much the total attribution of network and the rythms of transaction of all appliances.

The philosophy of such type of communication between the appliances in a network of wireless communication, is based on the collaboration of appliances, a significance that has begun to occupy particularly so much the academic space, it can be proved effective in the confrontation of restrictions of attribution of wireless networks that is owed in the mobility of users but also in the lack of resources of network. With the growth of technology, the wireless systems tend they are exceptionally heterogeneous, make that lends a particularly right moment in the application of amplify and forward (relaying) via the collaboration of appliances in the wireless local networks (Wireless Local Area Networks – WLANs). Such type promotion of movement it is focused mainly in the planning of Medium Access Control (MAC) layer, in the analysis and in the challenges of WLANs but also in the way of planning of network of collaboration of appliances for exceptionally dynamic networks that can include a big number of moved nodes.

Objective of work is the study of profits of promotion of movement from intermediary appliances in the total output but also in the rythm of transaction of each appliance, as well as the growth and evaluation of processes in order to it decides a appliance when it will be supposed it promotes parcels of other appliance that have low rythm of transmission.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 6
Κεφάλαιο 1: Επικοινωνία προώθησης κίνησης..... 8
1.1. Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 8
1.2. Ανάπτυξη της επικοινωνίας προώθησης κίνησης..... 11
1.3. Βασικό μοντέλο συστήματος επικοινωνίας προώθησης κίνησης..... 13
1.4. Είδη προώθησης κίνησης 14
1.4.1. Ενίσχυση και Προώθηση Κίνησης (AFR)..... 15
1.4.2. Αποκωδικοποίηση και Προώθηση Κίνησης (DFR) 18
1.4.3. Αποδιαμόρφωση και Προώθηση Κίνησης (DemFR) 21
1.4.4. Συμπίεση και Προώθηση Κίνησης (CFR)..... 22
1.5. Στάδια προώθησης κίνησης..... 22
1.6. Πιθανά οφέλη & περιορισμοί της επικοινωνίας προώθησης κίνησης..... 25
Κεφάλαιο 2: Ανάλυση της προώθησης κίνησης ενδιάμεσων συσκευών 28
2.1. Ταξινόμηση των πρωτοκόλλων του στρώματος MAC 29
2.2. Πρωτόκολλα προώθησης κίνησης..... 30
2.2.1. Πρωτόκολλα με βάση την εκπομπή 31
2.2.2. Ευκαιριακά Πρωτόκολλα 33
2.2.3. Πρωτόκολλα πολλαπλών αναπηδήσεων 34
2.2.4. Υβριδική προώθηση κίνησης 34
2.3. Λειτουργίες προώθησης κίνησης 36
2.3.1. Επιλογή της καταλληλότερης συσκευής 37
2.3.2. Μετάδοση συνεργασίας..... 39
Κεφάλαιο 3: Παράδειγμα προσομοίωσης μέσω του MATLAB-Simulink……...40
3.1 Εισαγωγή……40
3.2 Εισαγωγικά για το παρουσιαζόμενο παράδειγμα……...41
3.3 Τύπος καναλιού Rayleigh-fading……...42

3.4 Λευκός προσθετικός θόρυβος…….. ..43

3.5 Τετραγωνική Διαμόρφωση Ολίσθησης Φάσης……..46

3.6 Λεπτομέρειες της παρουσιαζόμενης υλοποίησης…… ..47

3.7 Γραφική παράσταση Bit Error Rate……. …50

3.8 Σχολιασμός αποτελεσμάτων……... ...51

3.9 Επίλογος πρακτικού μέρους……...……53

Βιβλιογραφία..... 54

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει στηριχθεί στην ικανότητά τους να παρέχουν επικοινωνία οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Αυτό το χαρακτηριστικό τους έχει μεγάλη σημασία στη σύγχρονη κοινωνία και συνοδεύεται από παράλληλη εξάπλωση ασύρματων υπηρεσιών και συσκευών, όπως κινητές επικοινωνίες και WiFi ή ασύρματα τηλέφωνα. Η αυξητική αυτή τάση των ασύρματων δικτύων είναι ο κύριος κινητήριος παράγοντας για την ανάπτυξη νέων ασύρματων τεχνολογιών που μπορούν να στηρίξουν μια αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική μετάδοση. Μια από τις νέες αυτές ασύρματες τεχνολογίες είναι και η δημιουργία δικτύων που βασίζονται στην συνεργασία των συσκευών, δηλαδή στην προώθηση κίνησης (relaying) μέσω ενδιάμεσων συσκευών.

Η δικτύωση συνεργασίας συσκευών μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικιλία εφαρμογών, όπως: η αύξηση της ικανότητας ή η επέκταση της κάλυψης σε κυψελοειδή δίκτυα, η ενίσχυση της αξιοπιστίας μετάδοσης και απόδοσης του δικτύου σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs), η δημιουργία πιο σταθερών συνδέσεων σε ασταθείς και δυναμικές συνθήκες διάδοσης σε επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων, η εξοικονόμηση ενέργειας και η παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου σε ασύρματα Ad-hoc δίκτυα.

Παρόλο που η δικτύωση συνεργασίας μεταξύ συσκευών έχει να παρουσιάσει μια πλούσια βιβλιογραφία, μέχρι πριν από ελάχιστα χρόνια, οι προσπάθειες εφαρμογής των συστημάτων συνεργασίας ήταν πολύ περιορισμένες. Η δικτύωση συνεργασίας αναφέρεται στην προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών, στην κατανομή των πόρων και στην υλοποίηση κατανεμημένων πρωτοκόλλων μεταξύ πολλών κόμβων σε ένα δίκτυο. Η συνεργασία συσκευών στον τομέα των επικοινωνιών επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, όπως: η συνεργασία συσκευών για προώθηση κίνησης των δεδομένων μιας πηγής, η συνεργασία μεταξύ των κόμβων σε ένα σύμπλεγμα (cluster) και η συνεργασία μεταξύ πηγής και αναμεταδότη για παράλληλη μετάδοση με σκοπό την επίτευξη διαφορικότητας (diversity). Υπάρχουν πολλές τεχνικές υποστήριξης της συνεργασίας μεταξύ των συσκευών στο φυσικό στρώμα (physical layer), αλλά η μέγιστη απόδοση ενός συστήματος συνεργασίας συσκευών επιτυγχάνεται μέσω της ενσωμάτωσης της συνεργασίας αυτής στο MAC layer [1]. Η ενσωμάτωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλων MAC πρωτοκόλλων συνεργασίας συσκευών και τη δημιουργία μιας προώθησης κίνησης μέσω των ενδιάμεσων συσκευών.

Κατά την τελευταία δεκαετία, η πρόσβαση στο Internet έχει γίνει ουσιαστικά ασύρματη, αφού οι τεχνολογίες 802.11 μπορούν να προσφέρουν μια χαμηλού κόστους ευρυζωνική υποστήριξη στην ευέλικτη και εύκολη δημιουργία ασύρματων δικτύων. Ωστόσο, τα κανάλια επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα υποβάλλονται σε παρεμβολές που, λόγω της εξασθένησης και των σφαλμάτων στο ασύρματο μέσο, οδηγούν σε μείωση της συνολικής απόδοσης του

δικτύου [2]. Η εξασθένηση σε ένα ασύρματο περιβάλλον μπορεί να ταξινομηθεί σε γρήγορη ή αργή [3]. Ενώ η γρήγορη εξασθένηση μπορεί να μετριαστεί από την αναμετάδοση των πλαισίων (frames) της πηγής, η αργή εξασθένηση που προκαλείται από απόφραξη της κύριας διαδρομής σήματος, κάνει την αναμετάδοση άχρηστη, αφού οι περίοδοι χαμηλής ισχύος διαρκούν για όλη τη διάρκεια της μετάδοσης του σήματος. Επιπλέον, η παρεμβολή από άλλους πομπούς επηρεάζει σοβαρά την ποιότητα της επικοινωνίας. Λόγω της συνεχούς μεταβολής του περιβάλλοντος και της κινητικότητας τόσο των πομπών όσο και των δεκτών, το σήμα διασκορπίζεται σε πολλά σημεία στο περιβάλλοντα χώρο. Αυτές οι βλάβες των καναλιών επικοινωνίας μπορούν να μετριαστούν με την αξιοποίηση της διαφορικότητας που παρέχει η συνεργασία των συσκευών και η προώθηση κίνησης από τις ενδιάμεσες συσκευές.

Όσον αφορά τα WLAN, τα δίκτυα αυτά πάσχουν, μεταξύ άλλων θεμάτων, από την έλλειψη του εύρους ζώνης, η οποία περιορίζει την απόδοση του δικτύου και απαιτεί αποτελεσματική αξιοποίηση αυτού του πολύτιμου πόρου. Παράδειγμα τέτοιου προβλήματος μπορεί να αποτελέσει η μεγάλου βαθμού μείωση της απόδοσης του δικτύου στην περίπτωση κατά την οποία κυριαρχούν οι κόμβοι με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Η προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών μπορεί να μετριάσει το πρόβλημα αυτό, επιτρέποντας στις συσκευές χαμηλού ρυθμού μετάδοσης να ολοκληρώσουν τη μετάδοσή τους πιο γρήγορα, χρησιμοποιώντας ενδιάμεσες συσκευές που παρέχουν καλύτερες συνθήκες μετάδοσης από ότι το άμεσο κανάλι που συνδέει την πηγή με τον τελικό προορισμό.

Κεφάλαιο 1: Επικοινωνία προώθησης κίνησης

Η επικοινωνία προώθησης κίνησης (relay communication) αναφέρεται στην τεχνολογία κατά την οποία η επικοινωνία μεταξύ της πηγής και του τελικού προορισμού επιτυγχάνεται ή ενισχύεται μέσω ενός ή περισσοτέρων προωθητών κίνησης ή αναμεταδοτών (relays). Οι προωθητές κίνησης μπορεί να είναι σταθμοί αναμετάδοσης που έχουν κατασκευαστεί για να υποστηρίξουν την ασύρματη σύνδεση, ή άλλες κινητές ενδιάμεσες συσκευές που έχουν επιλεγεί για τη διευκόλυνση της προώθησης των δεδομένων από την πηγή προς τον τελικό προορισμό.

Η επικοινωνία προώθησης κίνησης είναι γνωστή επίσης και με τον όρο επικοινωνία συνεργασίας (cooperative communication), λόγω της φιλοσοφίας της τεχνολογίας [5]. Η μετάδοση της πληροφορίας από την πηγή στον τελικό προορισμό, σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο με επικοινωνία προώθησης κίνησης πραγματοποιείται κατ' ελάχιστο με δύο αναπηδήσεις (hops). Στην πράξη, βέβαια, η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών αναπηδήσεων (multi-hop). Λόγω της ιδιαιτερότητας και της πολυπλοκότητας του μοντέλου πολλαπλών αναπηδήσεων, η ανάλυση του μεθόδων προώθησης κίνησης που θα εξεταστούν στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει με βάση το μοντέλο των δύο αναπηδήσεων (two-hops).

1.1. Το πρωτόκολλο IEEE 802.11

Το IEEE 802.11 είναι ένα σύνολο προδιαγραφών ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) και φυσικού επιπέδου (PHY) για την υλοποίηση ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) στις ζώνες συχνοτήτων 2,4, 3,6, 5 και 60 GHz. Δημιουργήθηκε και συντηρείται από την επιτροπή IEEE LAN / MAN Προτύπων (IEEE 802). Η βασική έκδοση του προτύπου κυκλοφόρησε το 1997 και είχε μεταγενέστερες τροποποιήσεις. Το πρότυπο και οι τροποποιήσεις του παρέχουν τη βάση για τα προϊόντα ασύρματου δικτύου χρησιμοποιώντας το σήμα Wi-Fi. Ενώ κάθε τροποποίηση επίσημα ανακαλείται όταν ενσωματώνεται στην τελευταία έκδοση του προτύπου, ο επιχειρηματικός κόσμος τείνει να εμπορεύεται τις αναθεωρήσεις επειδή συνοπτικά υποδηλώνουν τις δυνατότητες των προϊόντων τους. Ως εκ τούτου, στην αγορά, κάθε αναθεώρηση τείνει να γίνει ξεχωριστό πρότυπο.

Ο όρος Wi-Fi (Wireless Fidelity) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές που βασίζονται στις προδιαγραφές IEEE 802.11 b/g/n και εκπέμπουν σε συχνότητες 2,4GHz. Ωστόσο το WiFi έχει επικρατήσει και ως όρος αναφερόμενος συνολικά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα.

Οι σημαντικότερες από τις τροποποιήσεις του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 που έχουν εμφανιστεί στην αγορά είναι οι παρακάτω:

i) 802.11b

Το πρότυπο 802.11b έχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 11 Mbit/sec και χρησιμοποιεί την ίδια μέθοδο πρόσβασης μέσων που ορίζεται στο αρχικό πρότυπο. Τα προϊόντα 802.11b εμφανίστηκαν στην αγορά στις αρχές του 2000, αφού το 802.11b είναι η άμεση προέκταση της τεχνικής διαμόρφωσης που ορίζεται στο αρχικό πρότυπο. Η δραματική αύξηση στην απόδοση του 802.11b (σε σύγκριση με το αρχικό πρότυπο), με την παράλληλη σημαντική μείωση των τιμών, οδήγησε στην ταχεία αποδοχή του 802.11b ως την βασική ασύρματη τεχνολογία τοπικών δικτύων (WLAN).

Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει το πρότυπο είναι ότι οι συσκευές που χρησιμοποιούν το 802.11b δέχονται παρεμβολές από άλλα προϊόντα που λειτουργούν στη ζώνη των 2,4 GHz, όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων, οι συσκευές Bluetooth, οι συσκευές παρακολούθησης βρεφών, τα ασύρματα τηλέφωνα καθώς και κάποιος εξοπλισμός ραδιοερασιτεχνών.

ii) 802.11g

Τον Ιούνιο του 2003, επικυρώθηκε το τρίτο πρότυπο διαμόρφωσης, το 802.11g. Λειτουργεί στη ζώνη των 2,4 GHz (όπως και το 802.11b), αλλά χρησιμοποιεί το ίδιο σύστημα μετάδοσης OFDM με το 802.11a. Έχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων φυσικού επιπέδου 54 Mbit/sec, εξαιρουμένου του κωδικού διόρθωσης σφάλματος, επομένως η μέση απόδοσή του φτάνει περίπου τα 22 Mbit/sec [41]. Το hardware υλικό του 802.11g είναι πλήρως συμβατό με του 802.11b και ως εκ τούτου, το χαρακτηριστικό αυτό σε συνδυασμό με το σύστημα μετάδοσης OFDM που χρησιμοποιεί, μειώνουν την απόδοσή του κατά 21% σε σύγκριση με το 802.11a.

Το τότε προτεινόμενο πρότυπο 802.11g υιοθετήθηκε γρήγορα από τους καταναλωτές, από τον Ιανουάριο του 2003, πολύ πριν από την κύρωση, λόγω της επιθυμίας για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, καθώς και για μείωση του κόστους παραγωγής. Μέχρι το καλοκαίρι του 2003, τα περισσότερα dual-band 802.11a/b προϊόντα έγιναν dual-band / tri-mode, υποστηρίζοντας τα a και b / g με μόνο μία κάρτα κινητού προσαρμογέα ή σημείου πρόσβασης. Μεγάλες προσπάθειες έγιναν στο να μπορούν τα b και g να λειτουργούν καλά μαζί. Ωστόσο, σε ένα δίκτυο 802.11g, η δραστηριότητα μιας συσκευής 802.11b θα μειώσει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του συνολικού δικτύου 802.11g.

Το πρόβλημα των παρεμβολών από τις συσκευές που λειτουργούν στη ζώνη των 2,4 GHz, δεν μπόρεσε να λυθεί ούτε για τις συσκευές 802.11g.

iii) 802.11a

Αρχικά περιγράφηκε ως ρήτρα 17 της προδιαγραφής του 1999, η κυματομορφή OFDM (802.11a) στα 5,8 GHz ορίζεται πλέον ως η ρήτρα 18 της προδιαγραφής του 2012 και παρέχει τα πρωτόκολλα που επιτρέπουν τη μετάδοση και λήψη δεδομένων σε ταχύτητες από 1,5 έως 54 Mbit/sec. Έχει ευρεία εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο, ιδιαίτερα στο εταιρικό πλαίσιο. Ενώ η αρχική τροπολογία δεν είναι πλέον έγκυρη, ο όρος "802.11a" εξακολουθεί να χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές σημείων ασύρματης πρόσβασης (κάρτες και routers) για να περιγράψει τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων τους στα 5,8 GHz και 54 Mbit/sec.

Το πρότυπο 802.11a χρησιμοποιεί το ίδιο πρωτόκολλο στρώματος ζεύξης δεδομένων (data link layer protocol) και την ίδια μορφή πλαισίου (frame format) με το αρχικό πρότυπο, αλλά ένα OFDM-based physical layer. Λειτουργεί στη ζώνη των 5 GHz, με μέγιστη καθαρή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων των 54 Mbit/sec (συν τον κωδικό διόρθωσης σφάλματος), γεγονός που σημαίνει ότι τελικά αποδίδει μια ρεαλιστικά επιτεύξιμη καθαρή απόδοση της τάξης των 25 Mbit/sec [39].

Με δεδομένο ότι η ζώνη των 2.4 GHz χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό, σε σημείο συνωστισμού, η χρήση της σχετικά αχρησιμοποίητης συχνότητας των 5 GHz δίνει στο 802.11a ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Ωστόσο, αυτή η υψηλή συχνότητα φέροντος δημιουργεί παράλληλα και ένα μειονέκτημα: το αποτελεσματικό συνολικό φάσμα του 802.11a είναι μικρότερο από εκείνο των 802.11b/g. Στη θεωρία, τα σήματα 802.11a απορροφώνται πιο εύκολα από τοιχώματα και άλλα στερεά αντικείμενα λόγω του μικρότερου μήκους κύματος τους, και, ως εκ τούτου, δεν μπορεί να διεισδύσει όσο εκείνα του 802.11b. Στην πράξη, το 802.11b έχει συνήθως μεγαλύτερο εύρος στις χαμηλές ταχύτητες (μειώνει την ταχύτητά του στα 5,5 Mbit/sec ή ακόμα και στο1 Mbit/sec σε χαμηλές εντάσεις σήματος). Και στο 802.11a υπάρχουν παρεμβολές, [40], αλλά ουσιαστικά στην μπάντα των 5 GHz υπάρχουν λιγότερα σήματα τα οποία μπορεί να τις προκαλούν, με αποτέλεσμα λιγότερες παρεμβολές και μεγαλύτερη απόδοση.

iv) 802.11n

Το 802.11n είναι μια τροπολογία που βελτιώνει τα προηγούμενα πρότυπα 802.11 με την προσθήκη κεραιών πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (multiple-input multiple-output - MIMO). Λειτουργεί τόσο στα 2,4 GHz όσο και στα 5 GHz, με μεγαλύτερη εφαρμογή στην πρώτη μπάντα συχνοτήτων, καθώς η υποστήριξη στα 5 GHz είναι προαιρετική. Η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων ποικίλει από 54 Mbit/sec έως 600 Mbit/sec. Το IEEE ενέκρινε την τροποποίηση, η οποία δημοσιεύθηκε τον Οκτώβριο του 2009 [42]. Πριν από την

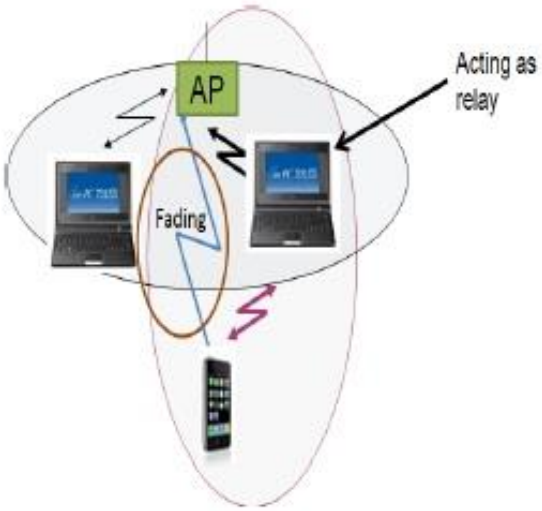
τελική επικύρωση, πολλές επιχειρήσεις είχαν ήδη μεταφερθεί σε δίκτυα 802.11n βασιζόμενες στην πιστοποίηση των προϊόντων της Wi-Fi Alliance, σύμφωνα με το σχέδιο πρότασης του 802.11n που είχε κατατεθεί το 2007.

1.2. Ανάπτυξη της επικοινωνίας προώθησης κίνησης

Η βασική ιδέα της επικοινωνίας προώθησης κίνησης μπορεί να αναχθεί στην πρωτοποριακή εργασία των Cover και El Gamal, του 1979, σχετικά με τις πληροφορίες των θεωρητικών ιδιοτήτων ενός καναλιού αναμετάδοσης [6]. Ο τελικός προορισμός λαμβάνει εξασθενημένες εκδοχές του σήματος της πηγής, οι οποίες μεταδίδονται από διαφορετικές τοποθεσίες μέσω παραγόμενης χωρικής διαφορικότητας. Ο συνδυασμός των εκδοχών αυτών δημιουργεί ένα σήμα χωρίς σφάλματα.

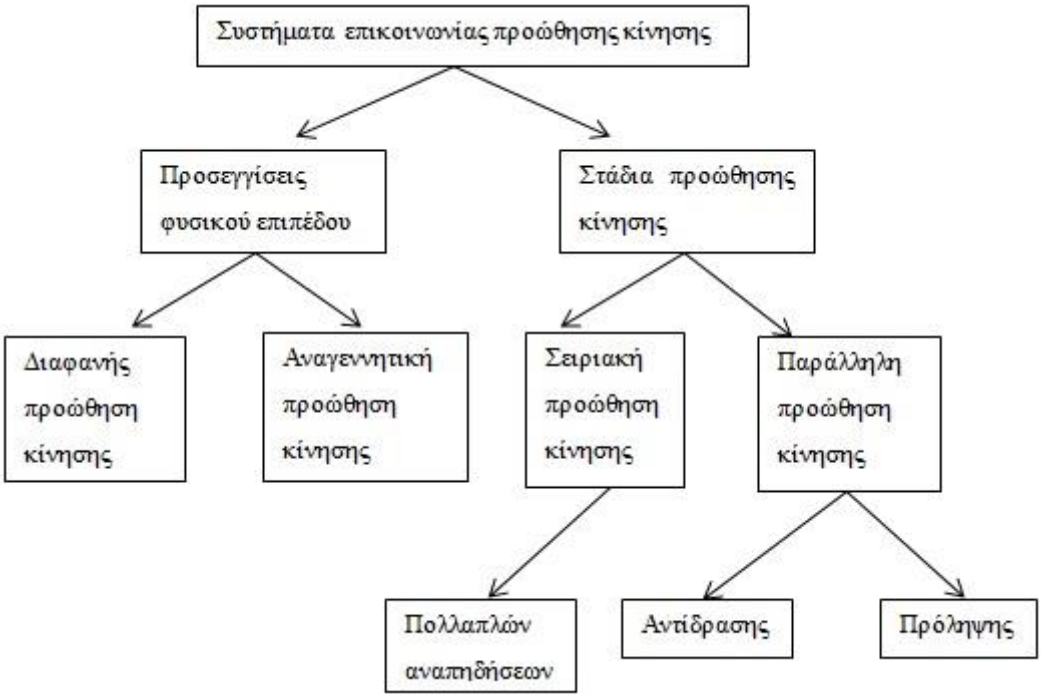
Οι τωρινές προτάσεις των δικτύων επικοινωνίας προώθησης κίνησης χαρακτηρίζονται από περιορισμένη εστίαση, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας που γίνεται, επικεντρώνεται στο φυσικό επίπεδο (physical layer) με σκοπό την αξιοποίηση της χωρικής διαφορικότητας για την αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος επικοινωνίας [4]. Στην απλούστερη εκδοχή, μια συσκευή προσπαθεί να συνδεθεί με ένα σταθμό βάσης μέσω μιας συσκευής προώθησης κίνησης. Λόγω της φύσης της εκπομπής του ασύρματου καναλιού, η συσκευή προώθησης κίνησης μπορεί να «ακούσει» την μετάδοση του αποστολέα, να την αποκωδικοποιήσει, και, αν τη λάβει χωρίς σφάλματα, να την αναμεταδώσει. Ο σταθμός βάσης συνδυάζει αυτά τα δύο αντίγραφα της ίδιας μετάδοσης, μειώνοντας το ποσοστό σφάλματος των πακέτων. Η όλη διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με την απλή αναμετάδοση εξαιτίας της εκμετάλλευσης της χωρικής διαφορικότητας, εκτός από την χρονική διαφορικότητα.

Σε ένα σύστημα επικοινωνίας προώθησης κίνησης, κάθε ασύρματη ενδιάμεση συσκευή θεωρείται ότι μπορεί να μεταδώσει τα δικά της δεδομένα αλλά να ενεργεί και ως αναμεταδότης των δεδομένων άλλης συσκευής. Στην εικόνα 1 απεικονίζονται συσκευές που είναι σε θέση να ενεργούν ως προωθητές κίνησης που μεταδίδουν δεδομένα που «ακούν» από τις άλλες συσκευές μαζί με τα δικά τους δεδομένα. Αυτό δημιουργεί χωρική διαφορικότητα, δεδομένου ότι τα εξασθενημένα κανάλια δύο διαφορετικών συσκευών είναι στατιστικά ανεξάρτητα,.



Εικόνα 1: Αντιμετώπιση της επίδρασης της εξασθένησης μέσω προώθησης κίνησης

Ανάλογα με τους διαφορετικούς τρόπους χρήσης των συσκευών προώθησης κίνησης σε ένα σύστημα επικοινωνίας προώθησης κίνησης, τα συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 2. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος επικοινωνίας προώθησης κίνησης μπορεί να γίνει με προσεγγίσεις του φυσικού στρώματος ή με προσεγγίσεις υψηλότερων στρωμάτων (στάδια προώθησης κίνησης ή αναμετάδοση συνεργασίας συσκευών).

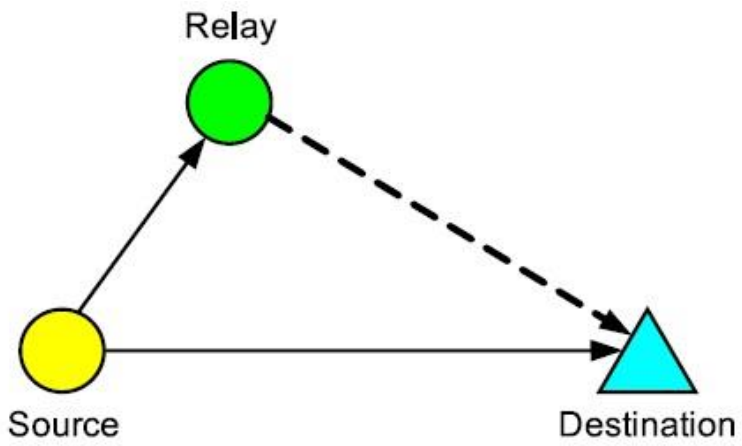


Εικόνα 2: Ταξινόμηση συστημάτων επικοινωνίας προώθησης κίνησης

Με βάση τις προσεγγίσεις του φυσικού επιπέδου, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων προώθησης κίνησης: η διαφανής προώθηση κίνησης (transparent relaying) και η αναγεννητική προώθηση κίνησης (regenerative relaying). Στη διαφανή προώθηση κίνησης η συσκευή δεν αποκωδικοποιεί δεδομένα από το σήμα που λαμβάνει μέσω της άμεσης σύνδεσης. Παραδείγματα διαφανούς προώθησης κίνησης αποτελούν η Ενίσχυση και Προώθηση Κίνησης (Amplify and Forward Relaying - AFR) και η Αποθήκευση και Προώθηση Κίνησης (Store and Forward Relaying -SFR) [7]. Στην αναγεννητική προώθηση κίνησης, η συσκευή αποκωδικοποιεί τα λαμβανόμενα πακέτα, επανακωδικοποιεί την πληροφορία και τη διαβιβάζει στον τελικό προορισμό. Παράδειγμα αναγεννητικής προώθησης κίνησης είναι η Αποκωδικοποίηση και Προώθηση Κίνησης (Decode and Forward Relaying - DFR) [8].

1.3. Βασικό μοντέλο συστήματος επικοινωνίας προώθησης κίνησης

Στην εικόνα 3 απεικονίζεται το βασικό μοντέλο ενός συστήματος επικοινωνίας προώθησης κίνησης. Η πηγή και ο τελικός προορισμός μπορεί να είναι ασύρματες συσκευές ή ένα από τα δύο μπορεί να είναι σταθμός βάσης.



Εικόνα 3: Βασικό μοντέλο ενός συστήματος επικοινωνίας προώθησης κίνησης

Περιορισμοί στην τεχνολογία ραδιοεπικοινωνιών δημιουργούν προβλήματα στην επίτευξη της αμφίδρομης επικοινωνίας (full-duplex), δηλαδή της σύγχρονης εκπομπής και λήψης σημάτων μέσω καναλιού ίδιας συχνότητας [9]. Ο περιορισμός αυτός είναι γνωστός ως περιορισμός μονόδρομης επικοινωνίας (half-duplex constraint) και στην πράξη αίρεται με χρονικό χωρισμό (Time-Division Duplexing - TDD) ή με χωρισμό συχνότητας (Frequency-Division Duplexing - FDD) των σημάτων εκπομπής και λήψης.

Για λόγους απλότητας, θεωρούμε ότι μια εκπομπή δύο αναπηδήσεων χωρίζεται χρονικά, δηλαδή με πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA). Θεωρούμε επίσης, εκπομπή μονόδρομης επικοινωνίας με ίση κατανομή χρόνου στα

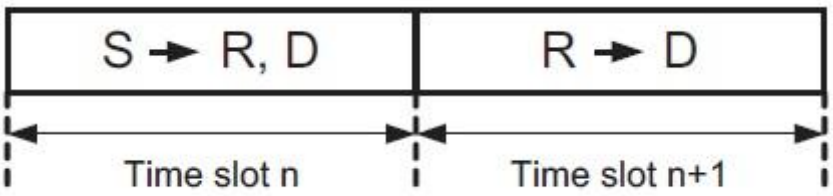
δύο χρονικά διαστήματα (time slots) (Εικ.4) και ότι κάθε συσκευή είναι εφοδιασμένη με μία μόνο κεραία. Στο πρώτο χρονικό διάστημα *n*, η πηγή εκπέμπει το σήμα $x_s[n]$. Για ένα κανάλι επίπεδης εξασθένησης, το λαμβανόμενο σήμα στην ενδιάμεση συσκευή και στον τελικό προορισμό, δίνεται από τις σχέσεις

$$\begin{aligned} y_r[n] &= h_{s,r} x_s[n] + z_r[n] \\ y_d[n] &= h_{s,d} x_s[n] + z_d[n] \end{aligned} \qquad (1)$$

όπου $y_r[n]$ και $y_d[n]$ είναι το λαμβανόμενο σήμα στην ενδιάμεση συσκευή και στον τελικό προορισμό, αντίστοιχα. Στο δεύτερο χρονικό διάστημα $n+1$, η πηγή δεν εκπέμπει, ενώ η ενδιάμεση συσκευή εκπέμπει το σήμα $x_r[n+1]$ προς τον τελικό προορισμό.

$$y_d[n+1] = h_{r,d} x_r[n+1] + z_d[n+1] \quad (2)$$

όπου $y_d[n + 1]$ είναι το λαμβανόμενο σήμα στον τελικό προορισμό, το χρονικό διάστημα $n + 1$. Στις παραπάνω σχέσεις, $h_{i,j}$ είναι ο συντελεστής του καναλιού πομπού και δέκτη και z_j είναι ο επιπρόσθετος θόρυβος στον δέκτη, όπου $i \in \{s, r\}$ και $j \in \{r, d\}$. Για κανάλι με διαλείψεις Rayleigh, το z_j παίρνει τις ανεξάρτητες τυχαίες τιμές $CN(0,N_0)$, όπου N_0 είναι η μεταβολή του θορύβου.



Εικόνα 4: Εκπομπή half-duplex

1.4. Είδη προώθησης κίνησης

Τα είδη προώθησης κίνησης αφορούν τους τρόπους επεξεργασίας του σήματος στις ενδιάμεσες συσκευές, δηλαδή το πως δημιουργείται το $x_r[n+1]$ της σχέσης (2). Τα διαφορετικά είδη προώθησης κίνησης παρουσιάζουν διαφορετικές δυσκολίες υλοποίησης και οδηγούν σε διαφορετική απόδοση του συστήματος όσον αφορά την ποιότητα του σήματος που καταλήγει στον τελικό προορισμό. Στην συνέχεια της ενότητας θα εξεταστούν τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη προώθησης κίνησης, σήμερα.

1.4.1. Ενίσχυση και Προώθηση Κίνησης (AFR)

Οι ενδιάμεσες συσκευές που λειτουργούν με ενίσχυση και προώθηση κίνησης (AFR) μοιάζουν κατά πολύ με τους παραδοσιακούς αναλογικούς αναμεταδότες, οι οποίοι εκπέμπουν μια ενισχυμένη έκδοση του σήματος που λαμβάνουν, δηλαδή [9]:

$$x_r[n+1] = \beta y_r[n] \qquad (3)$$

με περιορισμό ισχύος β, που δίνεται από τη σχέση:

$$\beta \leq \sqrt{\frac{P_R}{\left|h_{s,r}\right|^2 P_S + N_0}} \qquad (4)$$

όπου P_S και P_R είναι οι περιορισμοί ισχύος της πηγής και του αναμεταδότη, αντίστοιχα. Η μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα επιτυγχάνεται, όταν ο παράγοντας ενίσχυσης β στην (4), δίνεται από την ισότητα της σχέσης. Με δεδομένο ότι ο τελικός προορισμός λαμβάνει την ίδια πληροφορία από την πηγή και την ενδιάμεση συσκευή σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, οι δύο εκδόσεις του λαμβανόμενου σήματος μπορούν να αποκωδικοποιηθούν στον τελικό προορισμό με χρήση της τεχνικής συνδυασμού μέγιστης αναλογίας. Η διαδικασία αυτή δεν απαιτεί ενδιάμεσες συσκευές μεγάλης πολυπλοκότητας και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας επεξεργασίας δεδομένων λόγω της μη αναγκαιότητας επεξεργασίας του σήματος για τις διαδικασίες της αποκωδικοποίησης. Επιπλέον, οι ενδιάμεσες συσκευές AFR αποτελούν παραδείγματα διαφανούς προώθησης κίνησης που μπορεί να προσαρμοστεί σε τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται από την πηγή.

Αν θεωρήσουμε ότι τα χρονικά διαστήματα των δύο φάσεων προώθησης κίνησης που απεικονίζονται στην εικόνα 4, είναι ίσα, τότε σύμφωνα με την ανάλυση των J. N. Laneman, D. N. Tse και G. W. Wornell [9], η ενίσχυση και προώθηση κίνησης επιτυγχάνει μια πλήρη διαφορικότητα δευτέρας τάξης για ένα σύστημα όπως αυτό που απεικονίζεται στην εικόνα 3.

Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα της τεχνικής AFR είναι η επιλογή της συνάρτησης προώθησης κίνησης. Στην περίπτωση που ένα κανάλι παρουσιάζει εξασθένηση, όταν η πληροφορία κατάστασης καναλιού (Channel State Information – CSI) είναι διαθέσιμη στην ενδιάμεση συσκευή, η κατανομή κέρδους είναι αυτή της σχέσης (4) [9]. Το μέσο ποσοστό σφάλματος bit (Bit Error Rate – BER) και η ανάλυση πιθανότητας διακοπής για διαφορετικούς τρόπους διαμόρφωσης σε ένα σύστημα AFR δύο αναπηδήσεων υπάρχουν στη μελέτη των P. Spalevic και συνεργάτες [10]. Αν η εξασθένηση ισχύος κατά τη πρώτη αναπήδηση είναι γνωστή, τότε η κατανομή κέρδους είναι σταθερή. Μια σταθερή κατανομή κέρδους στην περίπτωση της τεχνικής AFR δεν απαιτεί γνώση της κατάστασης του καναλιού

και παρουσιάζει μικρότερη πολυπλοκότητα αφού η κατανομή κέρδους δεν αλλάζει κατά τη διαδικασία της εξασθένησης.

Η σχέση (4) υπολογίζει την κατανομή κέρδους με βάση το μέσο της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος. Οι I. Abou-Faycal και M. Médard εξέτασαν ένα σύστημα κατανομής απολαβής που βασίζεται στο ίδιο το λαμβανόμενο σήμα [11]. Το εξεταζόμενο σενάριο ήταν ένα σύστημα προώθησης κίνησης δύο αναπηδήσεων, χωρίς απευθείας σύνδεση. Το μοντέλο του καναλιού ήταν AWGN (AdditiveWhite Gaussian Noise) και η διαμόρφωση που χρησιμοποιήθηκε δυαδική μετατόπιση φάσης (BPSK). Το σύστημα δεν είχε μνήμη, δηλαδή, κατά τη διάρκεια κάθε προώθησης κίνησης, το εκπεμπόμενο από την ενδιάμεση συσκευή σήμα εξαρτιόταν μόνο από το σύμβολο της τελευταίας της λήψης. Αποδείχθηκε ότι η βέλτιστη συνάρτηση ενίσχυσης είναι μια συνάρτηση Lambert W, οι παράμετροι της οποίας ποικίλουν ανάλογα με την διακύμανση του θορύβου και του σήματος εισόδου. Εδώ ο στόχος ήταν να ελαχιστοποιηθεί η μέση πιθανότητα ανίχνευσης σφάλματος. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι για μικρό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), η βέλτιστη συνάρτηση ενίσχυσης είναι παρόμοια με έναν περιοριστή, ενώ για μεγάλο SNR, η συνάρτηση αυτή είναι παρόμοια με έναν γραμμικό ενισχυτή.

Το βασικό σύστημα προώθησης κίνησης, όπου κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με μία μόνο κεραία, όπως φαίνεται στην εικόνα 3, χρησιμοποιήθηκε από τους R. U. Nabar και συνεργάτες [12], σε ένα άρθρο στο οποίο οι συγγραφείς ενοποίησαν προηγούμενα αποτελέσματα των πρωτοκόλλων ενός τέτοιου συστήματος και εξέτασαν την λειτουργία τριών διαφορετικών πρωτοκόλλων συνεργασίας που βασίζονταν σε TDMA. Χαρακτηριστικό των πρωτοκόλλων αυτών ήταν η διαφορά του βαθμού σύγκρουσης διάδοσης και λήψης (Πίνακας 1). Για κάθε πρωτόκολλο, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τρόποι προώθησης κίνησης (AFR και DFR) και αναλύθηκε η απόδοση χωρικής διαφορικότητας, για την οποία βρέθηκε ότι πλήρης χωρική διαφορικότητα (δευτέρας τάξης σε αυτή την περίπτωση) επιτυγχάνεται με ορισμένα πρωτόκολλα στα οποία χρησιμοποιείται κατάλληλος έλεγχος ισχύος. Μελετήθηκε επίσης ο σχεδιασμός κώδικα κατανεμημένου χώρου-χρόνου σε κανάλια με εξασθένηση που λειτουργούν με AFR. Αποδείχθηκε ότι τα κριτήρια σχεδιασμού ενός τέτοιου κώδικα αποτελούνται από τα κριτήρια παραδοσιακής κατάταξης και καθορισμού στην περίπτωση των παρατιθέμενων κεραιών, καθώς και από κατάλληλους κανόνες ελέγχου ισχύος. Για τη λειτουργία AFR, η σύγκριση της αμοιβαίας πληροφόρησης σε διαφορετικό καθεστώς δίνει την εξής ακολουθία:

$$I_I^{AFR} \geq I_{II}^{AFR} \geq I_{III}^{AFR} \qquad (5)$$

Το πρωτόκολλο I είναι το μόνο πρωτόκολλο που μπορεί να υποστηρίξει ένα κέρδος πολυπλεξίας με την κλασική έννοια και, ως εκ τούτου, την ανάκτηση σήματος (σε ορισμένο βαθμό) από την απώλεια της τάξης του 50%, σε φασματική απόδοση, λόγω του περιορισμού μονόδρομης επικοινωνίας. Και τα τρία συστήματα μπορούν να υποστηρίξουν πλήρη διαφορικότητα δευτέρας τάξης, αν βέβαια πρόκειται για κόμβους μιας κεραίας και εφαρμοστεί έλεγχος ισχύος.

Πινακας 1: Πρωτόκολλα TDMA με διαφορετικούς τρόπους προώθησης κίνησης ανά χρονικό διάστημα

Χρονικό διάστημα / Πρωτόκολλο	I	II	III
1	S→R,D	S→R,D	S→R
2	S→D,R→D	R→D	S→D,R→D

Σε συστήματα MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) AFR, η γραμμική επεξεργασία προώθησης κίνησης μεγιστοποιεί την αμοιβαία πληροφόρηση πηγής και τελικού προορισμού, χρησιμοποιώντας εκπομπή MIMO και CSI στις ενδιάμεσες συσκευές [13]. Σε μια ενδιάμεση συσκευή μπορούν να υπάρξουν τρία διαφορετικά επίπεδα CSI:

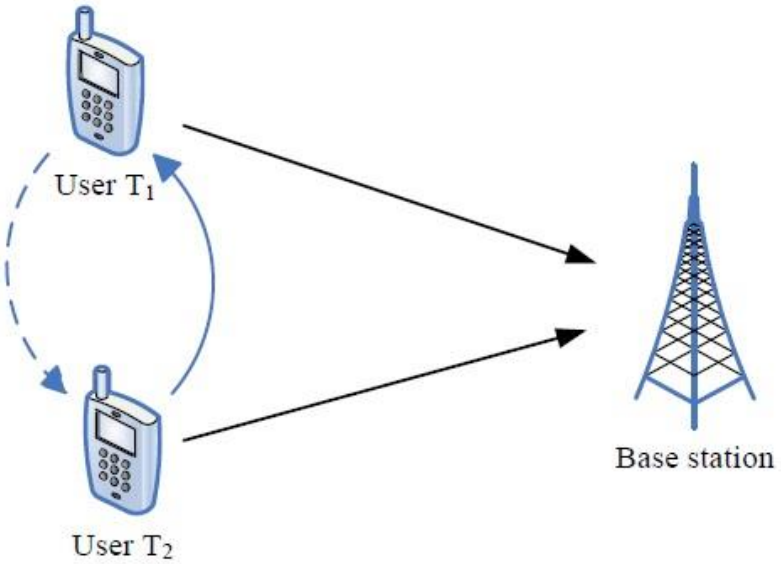
- μόνο για την πρώτη αναπήδηση (για το κανάλι μεταξύ πηγής και ενδιάμεσης συσκευής)
- και για τις δυο αναπηδήσεις (για τα κανάλια μεταξύ πηγής και ενδιάμεσης συσκευής και μεταξύ ενδιάμεσης συσκευής και τελικού προορισμού)
- σε ολόκληρο το σύστημα (τα δύο προηγούμενα κανάλια και του καναλιού άμεσης σύνδεσης μεταξύ πηγής και τελικού προορισμού)

Η βέλτιστη μήτρα γραμμικής επεξεργασίας στην ενδιάμεση συσκευή αποδεικνύεται ότι διαγωνοποιεί τα ισοδύναμα κανάλια από την πηγή προς τον τελικό προορισμό, ενώ η κατανομή του κέρδος για κάθε υποδίαυλο (subchannel) επιλέγεται σύμφωνα με την τεχνική waterfilling.

Οι I. Hammerstroem και A. Wittneben πρότειναν ένα σύστημα κατανομής ισχύος για AFR MIMO-OFDM [14]. Το σύστημα αυτό εφαρμόστηκε στα πεδία συχνότητας και χώρου των υποδιαύλων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του στιγμιαίου ρυθμού της σύνδεσης στην περίπτωση ύπαρξης του CSI στον πομπό.

1.4.2. Αποκωδικοποίηση και Προώθηση Κίνησης (DFR)

Μολονότι η τεχνική προώθησης κίνησης AFR είναι απλή στην εφαρμογή της, παρουσιάζει το πρόβλημα της προώθησης του σήματος χωρίς την απόρριψη του θορύβου, γεγονός που σημαίνει ότι η όλη διαδικασία μπορεί να υπόκειται σε αύξηση θορύβου. Η τεχνική αποκωδικοποίησης και προώθησης κίνησης (DFR) είναι ένα είδος προώθησης κίνησης που προσπαθεί να αναγεννήσει την πληροφορία των δεδομένων στην ενδιάμεση συσκευή και να προωθήσει μια «καθαρή» έκδοσή τους προς τον τελικό προορισμό. Στα συστήματα DFR συνήθως εφαρμόζονται κώδικες ανίχνευσης σφάλματος (π.χ. κώδικες CRC) και κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων (π.χ. κώδικες turbo), ώστε να εντοπιστούν και να διορθωθούν τα σφάλματα των δεδομένων που λαμβάνονται από την ενδιάμεση συσκευή. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της DFR, σε σύγκριση με την AFR, είναι η αποκωδικοποίηση των κωδίκων του καναλιού στην ενδιάμεση συσκευή.



Εικόνα 5: Περίπτωση uplink ζεύξης

Η προώθηση κίνησης DFR ήταν ένα από τα είδη προώθησης κίνησης που εφαρμόστηκαν στην περίπτωση συνεργασίας χρηστών (user cooperation) [15], κατά την οποία μελετήθηκε η περίπτωση μιας uplink ζεύξης της εικόνας 5. Εδώ τα δύο τερματικά T1 και T2 αντιπροσωπεύουν δύο ανεξάρτητους χρήστες κινητών που έχουν και οι δύο τα δικά τους δεδομένα τα οποία πρέπει να διαβιβάσουν στο σταθμό βάσης. Τα τερματικά θεωρούνται ότι υποστηρίζουν επικοινωνία full-duplex. Κάθε τερματικό χωρίζει τις πληροφορίες μετάδοσής του σε δύο μέρη: το πρώτο μέρος αποστέλλεται απευθείας στο σταθμό βάσης και το δεύτερο μέρος αποστέλλεται στο σταθμό βάσης μέσω του άλλου τερματικού. Η κατανομή ισχύος των δύο μερών των σημάτων καθιστά δυνατή την πλήρη αποκωδικοποίηση του δεύτερου μέρους του σήματος από το άλλο τερματικό. Λόγω της φύσης της εκπομπής των ασύρματων

καναλιών, κάθε τερματικό «ακούει» το σήμα εκπομπής κατά τη μετάδοση του άλλου τερματικού. Απεδείχθη ότι, ακόμη και αν το κανάλι μεταξύ των χρηστών είναι θορυβώδες, η συνεργασία αυτή οδηγεί σε μία αύξηση της περιοχής αποτελεσματικά λειτουργικού συντελεστή των χρηστών.

Στην πραγματικότητα η περίπτωση συνεργασίας των χρηστών της εικόνας 5 μπορεί να αναλυθεί στο βασικό μοντέλο του συστήματος προώθησης κίνησης της εικόνας 3, όπου η μόνη διαφορά είναι ότι κάθε τερματικό μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως πηγή πληροφοριών όσο και ως ενδιάμεση συσκευή. Το εφικτό κέρδος διαφορικότητας της DFR υπολογίστηκε από τους J. N. Laneman, D. N. Tse και G. W. Wornell [9] με βάση το βασικό μοντέλο προώθησης κίνησης της εικόνας 3. Αναλύοντας τις πιθανότητες διακοπής, τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι η DFR δεν προσφέρει κέρδος διαφορικότητας για μεγάλο SNR και για την περίπτωση που η ενδιάμεση συσκευή θα πρέπει να αποκωδικοποιήσει πλήρως το μήνυμα της πηγής. Αυτό συμβαίνει επειδή το κανάλι μεταξύ της πηγής και της ενδιάμεσης συσκευής οριοθετεί την συνολική απόδοση του συστήματος. Προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί αυτοί, προτάθηκε η λύση της επιλεκτικής προώθησης κίνησης (selection relaying) ή της επαυξημένης προώθησης κίνησης (incremental relaying), λύσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε με AFR είτε με DFR:

- Στην επιλεκτική προώθηση κίνησης, η πηγή αναμεταδίδει στο δεύτερο χρονικό διάστημα, εάν το path πηγής – ενδιάμεσης συσκευής πέσει κάτω από ένα ορισμένο όριο. Είναι μια προσαρμοστική εκδοχή εκπομπής προώθησης κίνησης που μεταπίπτει σε απευθείας μετάδοση εάν η ενδιάμεση συσκευή δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει
- Στη επαυξημένη προώθηση κίνησης, ο τελικός προορισμός στέλνει ανατροφοδοτήσεις στην πηγή και στην ενδιάμεση συσκευή κατά τη λήψη του συμβόλου από την πηγή στο πρώτο χρονικό διάστημα. Αν ο τελικός προορισμός μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά το λαμβανόμενο σύμβολο στο πρώτο χρονικό διάστημα, η πηγή μπορεί να μεταδώσει άμεσα το επόμενο μήνυμα και δεν απαιτείται προώθηση κίνησης

Τέλος αποδείχθηκε ότι με τον συνδυασμό της επιλεκτικής με την επαυξημένη προώθηση κίνησης η DFR μπορεί να επιτύχει πλήρη διαφορικότητα (διαφορικότητα δευτέρας τάξης σε αυτή την περίπτωση).

Η κωδικοποιημένη συνεργασία [16] χρησιμοποιεί την κωδικοποίηση καναλιού για τη συνεργασία των χρηστών, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί ως ένας πρακτικός τρόπος, χρησιμοποίησης της κωδικοποίησης καναλιού για την εφαρμογή της DFR. Στην περίπτωση αυτή, τα δεδομένα από την πηγή χωρίζονται σε δύο μέρη: το πρώτο μέρος είναι ένας

διατρητός συνελικτικός κώδικας (punctured convolutional code), που είναι από μόνος του ένας έγκυρος κώδικας, ενώ το δεύτερο μέρος αποτελείται από δυαδικά ψηφία ισοτιμίας (parity bits) που μαζί με το πρώτο μέρος μπορούν να σχηματίσουν ένα ισχυρότερο κώδικα. Η πηγή εκπέμπει το πρώτο μέρος του κώδικα και μετά την λήψη, η ενδιάμεση συσκευή αποκωδικοποιεί το μέρος αυτό και ελέγχει τον κώδικα CRC. Εάν είναι σωστός, η συσκευή σχηματίζει το δεύτερο μέρος (τα δυαδικά ψηφία ισοτιμίας) και το προωθεί προς τον τελικό προορισμό. Διαφορετικά, το δεύτερο μέρος δεν προωθείται από τη συσκευή. Τα δυαδικά ψηφία ισοτιμίας μπορεί να θεωρηθούν ως επαυξημένα bit πλεονασμού (incremental redundancy). Επιπλέον, η επιλογή ή όχι του τρόπου προώθησης κίνησης διαχειρίζεται αυτόματα μέσω της κωδικοποίησης του καναλιού αντί της ανατροφοδότησης. Έχει αποδειχθεί ότι η κωδικοποιημένη συνεργασία είναι επίσης ικανή να επιτύχει πλήρη διαφορικότητα που παρέχεται από τη συνεργασία των χρηστών. Βασισμένη στην ιδέα της κωδικοποιημένης συνεργασίας, μελετήθηκε η κωδικοποιημένη συνεργασία χώρου-χρόνου [17], όπου κάθε χρήστης μεταδίδει το δικό του, καθώς και το δεύτερο σετ δυαδικών ψηφίων ισοτιμίας του «συνεργάτη» του, με διαχωρισμό της διαθέσιμης ισχύος και με χρήση των κωδικών του χώρου-χρόνου μετά την επιτυχή αποκωδικοποίηση του πρώτου μέρους. Η ανάλυση και προσομοίωση έδειξε ότι η κωδικοποιημένη συνεργασία χώρου-χρόνου επιτρέπει στους χρήστες να λάβουν καλύτερη διαφορικότητα χώρου-χρόνου σε περιπτώσεις γρήγορης εξασθένησης, σε σύγκριση με την αρχική κωδικοποιημένη συνεργασία.

Αντί για την προώθηση των δυαδικών ψηφίων ισοτιμίας, οι X. Bao και J. Li [18] πρότειναν την προώθηση των soft πληροφοριών αξιοπιστίας που λαμβάνονται στις ενδιάμεσες συσκευές, δηλαδή, την soft information relaying. Στις παραδοσιακές DFR, η ενδιάμεση συσκευή αναμεταδίδει την hard decision των αποκωδικοποιημένων δυαδικών ψηφίων των δεδομένων. Έτσι, η πληροφορία αξιοπιστίας που λαμβάνεται κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης, χάνεται. Όταν η ποιότητα του καναλιού μεταξύ της πηγής και της ενδιάμεσης συσκευής είναι κακή, η συσκευή μπορεί να μην είναι σε θέση να κάνει τέλεια αποκωδικοποίηση και οι hard decisions της συσκευής μπορεί να είναι λανθασμένες. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, προτάθηκε ο αρχικός υπολογισμός των εκ των υστέρων πιθανοτήτων (A Posteriori Probabilities - APPs) των συμβόλων των πληροφοριών στην ενδιάμεση συσκευή. Με βάση τις APPs αυτές, η συσκευή υπολογίζει τις parity symbol soft εκτιμήσεις των πληροφοριών της πηγής και τις οποίες προωθεί στη συνέχεια προς τον τελικό προορισμό. Παρατηρώντας ότι η τεχνική AFR με δυαδικές εισόδους μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τρόπος προώθησης πληροφοριών soft αξιοπιστίας χωρίς τη χρησιμοποίηση των κωδίκων των καναλιών, οι X. Bao και J. Li [18], πρότειναν την τεχνική αποκωδικοποίησης, ενίσχυσης και προώθησης κίνησης (DAFR), η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των AFR και DFR. Κατά την DAFR η ενδιάμεση συσκευή υλοποιεί soft αποκωδικοποίηση και προωθεί τις

πληροφορίες αξιοπιστίας. Οι X. Bao και J. Li, επίσης παρουσίασαν μια υβριδική τεχνική που συνδυάζει την DAFR με κωδικοποιημένη συνεργασία μέσω απλής χρονομεριστικής μίσθωσης (time-sharing) [18]. Η τεχνική προώθησης soft πληροφοριών επιτυγχάνει καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με τις τεχνικές AFR και DFR.

Μια ακόμα τεχνική που προσπαθεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των AFR και DFR, προτάθηκε από τους Y. Li και B. Vucetic [19], όπου θεωρήθηκε ένα σύστημα με πολλαπλές ενδιάμεσες συσκευές. Οι συσκευές που χρησιμοποιούν την τεχνική DFR για να προωθήσουν τα δεδομένα προς τον τελικό προορισμό είναι μόνο εκείνες που αποκωδικοποιούν σωστά τα δεδομένα που εκπέμπονται από την πηγή και δεν χρησιμοποιούν την τεχνική AFR. Όλα τα σήματα των ενδιάμεσων αυτών συσκευών συνδυάζονται έτσι ώστε να ανακτηθούν οι πληροφορίες της πηγής. Αυτό το προσαρμοζόμενο πρωτόκολλο προώθησης κίνησης υπέρ-αποδίδει τα πλεονεκτήματα των τεχνικών AFR και DFR, ενώ αποδείχθηκε ότι το κέρδος απόδοσης μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού των ενδιάμεσων συσκευών.

1.4.3. Αποδιαμόρφωση και Προώθηση Κίνησης (DemFR)

Η τεχνική της αποδιαμόρφωσης και προώθησης κίνησης (DemFR) είναι πιο απλή σε σύγκριση με την DFR, καθώς η DemFR δεν πραγματοποιεί αποκωδικοποίηση καναλιού στις ενδιάμεσες συσκευές. Από την άλλη πλευρά, η DemFR προσπαθεί να αποφύγει την ενίσχυση του θορύβου, η οποία είναι το κύριο πρόβλημα της AFR, με την αποδιαμόρφωση των λαμβανόμενων σημάτων με βάση τη διαδικασία symbol-by-symbol. Τα αποδιαμορφωμένα σήματα στις ενδιάμεσες συσκευές επαναδιαμορφώνονται για να σχηματίσουν τα σύμβολα εκπομπής. Αν εφαρμοστεί η ίδια τεχνική διαμόρφωσης στην πηγή και στις ενδιάμεσες συσκευές, τότε ο τελικός προορισμός μπορεί να συνδυάσει συνεκτικά τα λαμβανόμενα σήματα από την πηγή και τις συσκευές. Οι T. Wang και συνεργάτες θεώρησαν ένα σύστημα αποτελούμενο από ένα μόνο ζεύγος πηγής-προορισμού με μία ή περισσότερες ενδιάμεσες συσκευές [20]. Προτάθηκε η ύπαρξη ενός συνδυαστή σύμφωνων βαρών (weighted coherent combiner) στον τελικό προορισμό, όπου τα βάρη λαμβάνουν υπόψη την ανίχνευση σφαλμάτων στις συσκευές. Αποδείχτηκε ότι η προτεινόμενη τεχνική επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή διαφορικότητα του συστήματος. Μια παρόμοια πρόταση παρουσιάστηκε από τους D. Chen και J. Laneman [21] κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν αποδιαμορφωτές με τμηματικά γραμμικούς συνδυασμούς ως προσέγγιση των μη γραμμικών ανιχνευτών Maximum Likelihood (ML) σε συστήματα συνεκτικής και μη συνεκτικής ανίχνευσης. Το προτεινόμενο σύστημα επιτυγχάνει μεγαλύτερα κέρδη διαφορικότητας σε σχέση με την τεχνική DFR, αλλά χάνει περίπου το μισό του κέρδους διαφορικότητας σε σχέση με την τεχνική AFR.

1.4.4. Συμπίεση και Προώθηση Κίνησης (CFR)

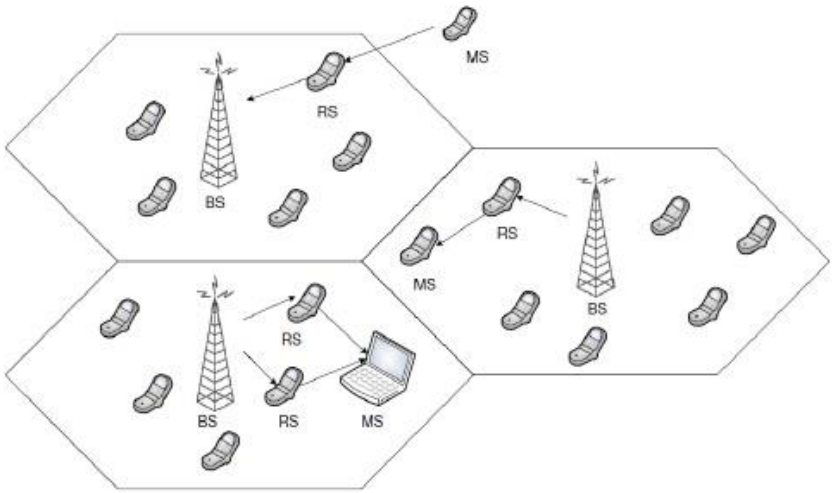
Η συμπίεση και προώθηση κίνησης (CFR) είναι μια τεχνική κατά την οποία οι ενδιάμεσες συσκευές ψηφιοποιούν το λαμβανόμενο από την πηγή σήμα και το προωθούν προς τον τελικό προορισμό χωρίς αποκωδικοποίησή του [8]. Βέλτιστη συμπίεση στην τεχνική CFR επιτυγχάνεται με κωδικοποίηση Wyner-Ziv [22]. Οι τεχνικές CFR και DFR συγκρίθηκαν με βάση τις θεωρητικές πτυχές της πληροφορίας [8] και θεωρώντας τις τεχνικές κωδικοποίησης των δύο αυτών τεχνικών για full-duplex ενδιάμεσες συσκευές στο βασικό μοντέλο ενός συστήματος προώθησης κίνησης της εικόνας 3. Όσον αφορά την τεχνική CFR, προτάθηκαν τεχνικές κωδικοποίησης που εκμεταλλεύονται τη στατιστική εξάρτηση μεταξύ των καναλιών εξόδου των συσκευών και του τελικού προορισμού. Αποδείχθηκε ότι η τεχνική DFR είναι χρήσιμη σε συσκευές που βρίσκονται κοντά στην πηγή ενώ η CFR είναι χρήσιμη σε συσκευές που βρίσκονται κοντά στον τελικό προορισμό.

1.5. Στάδια προώθησης κίνησης

Η επιλογή των σταδίων προώθησης κίνησης είναι πολύ σημαντική, διότι σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο οι ενδιάμεσες συσκευές μπορούν να ταξινομηθούν είτε σε εν σειρά λειτουργία είτε σε παράλληλη (Εικ. 2). Από τη μία πλευρά, η αύξηση του αριθμού των εν σειρά ταξινομημένων συσκευών προώθησης κίνησης μειώνει την απώλεια κατά μήκος του path σε κάθε αναπήδηση μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του αριθμού των παράλληλα ταξινομημένων συσκευών προώθησης κίνησης αυξάνει το πιθανό κέρδος διαφορικότητας. Η παράλληλη προώθηση κίνησης υλοποιείται στα PHY/MAC στρώματα (single-hop), ενώ η σειριακή μπορεί να υλοποιηθεί με συνδυασμό των στρωμάτων MAC και δρομολόγησης (multi-hop). Υπάρχουν δύο τύποι προσεγγίσεων υλοποίησης παράλληλης προώθησης κίνησης: η προώθηση κίνησης πρόληψης (proactive relaying) και η προώθηση κίνησης αντίδρασης (reactive relaying). Οι τύποι αυτοί θα εξεταστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Στην περίπτωση της προώθησης κίνησης πολλαπλών αναπηδήσεων, η χρήση των ενδιάμεσων συσκευών είναι πολύ πιο αποτελεσματική από όσο μια εκπομπή που απαιτεί πληροφορίες δρομολόγησης.

Πρόσφατα, η αξιοποίηση της διαφορικότητας του στρώματος σύνδεσης (link layer) σε ασύρματα δίκτυα πολλαπλών αναπηδήσεων έχει προσελκύσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η έρευνα στηρίζεται σε προσπάθειες που έχουν γίνει σε κυψελωτά δίκτυα μέσω της χρήσης προώθησης κίνησης από ενδιάμεσες συσκευές απλής αναπήδησης. Τέτοιου είδους δίκτυα μαστίζονται γενικά από τρία βασικά προβλήματα: παρεμβολών, περιορισμένης κάλυψης και έλλειψης χωρητικότητας. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, προτάθηκε, η επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης (BS) και ενός κινητού σταθμού (MS) να μην γίνεται μόνο άμεσα, αλλά και (ή αποκλειστικά) μέσω ενός σταθμού αναμετάδοσης (RS), όπως φαίνεται στην εικόνα 6 [23]. Μια τέτοια υλοποίηση μπορεί να αποφέρει

σημαντικά κέρδη, γεγονός που μπορεί να ενισχύσει την απόδοση των χρηστών περιορισμένης χωρητικότητας (κάτω αριστερή κυψέλη της εικ. 6), των χρηστών περιορισμένης κάλυψης (άνω αριστερή κυψέλη) ή των χρηστών με πολλές παρεμβολές (μεσαία-δεξιά κυψέλη). Η περίπτωση των δικτύων πολλαπλών αναπηδήσεων είναι πιο περίπλοκη, αφού στα εν λόγω δίκτυα ο σχεδιασμός των MAC πρωτοκόλλων αποτελεί ακόμα πρόκληση. Η πρόκληση αυτή αυξάνεται όταν τα τερματικά ή οι συσκευές κινούνται, κάτι που προκαλεί τη δημιουργία καναλιών χρονοεπιλεκτικής εξασθένησης (time-selective fading channels).



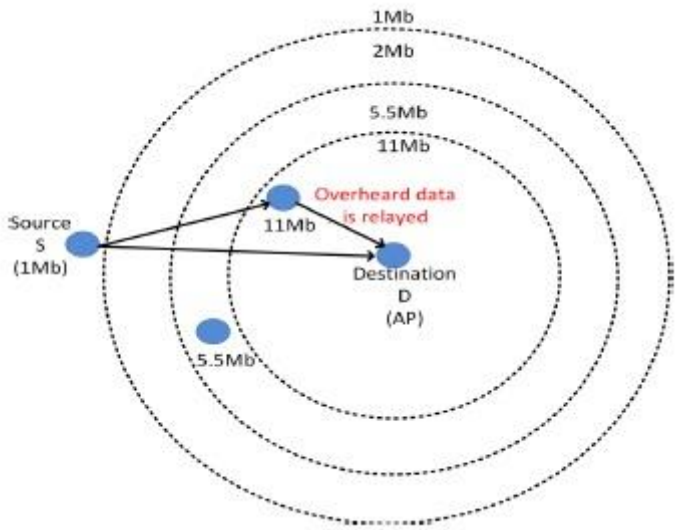
Εικόνα 6: Προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών σε κυψελωτά δίκτυα

Η προώθηση κίνησης μπορεί να ωφελήσει τόσο τους κόμβους που συμμετέχουν όσο και το σύνολο του δικτύου σε πολλές διαφορετικές πτυχές. Πολλά πρωτόκολλα MAC, για την αντιμετώπιση των δυσμενών συνθηκών που μπορεί να υπάρχουν στα κανάλια, έχουν εισαγάγει τεχνικές ρυθμού προσαρμογής. Μια ασύρματη συσκευή μπορεί να επικοινωνεί με μικρή ταχύτητα, λόγω της απόστασής της από το ασύρματο σημείο πρόσβασης (AP), σε σύγκριση με άλλες συσκευές που βρίσκονται πλησιέστερα προς το AP, γεγονός που οδηγεί στην χρήση των τεχνικών 802.11 ρυθμού προσαρμογής. Η εικόνα 7 απεικονίζει τα χαρακτηριστικά μετάδοσης των ασύρματων συσκευών, ως αποτέλεσμα της λειτουργικότητας του 802.11 ρυθμού προσαρμογής: οι συσκευές που βρίσκονται κοντά στο AP προωθούν τα δεδομένα με μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ αυτές που βρίσκονται πολύ μακριά από το AP μειώνουν την ταχύτητα προώθησης των δεδομένων μετά την ανίχνευση των frames που λείπουν. Στην εικόνα 7 φαίνεται ο σημαντικός ρόλος που μπορεί να παίξει η προώθηση κίνησης στην αύξηση της συνολικής απόδοσης του ασύρματου δικτύου. Η αύξηση αυτή επιτυγχάνεται ως εξής:

- Οι συσκευές με χαμηλή ταχύτητα προώθησης κίνησης προωθούν τα δεδομένα τους νωρίτερα από άλλες συσκευές

- Οι συσκευές με μεγάλη ταχύτητα προώθησης κίνησης διατηρούν την επιθυμητή απόδοση
- Το ασύρματο δίκτυο επιτυγχάνει μια καλή συνολική χωρητικότητα

Στην περίπτωση αυτή, ο συνολικός χρόνος μετάδοσης, για μετάδοση διπλής αναπήδησης, είναι μικρότερος από εκείνο που χρειάζεται για άμεση μετάδοση. Η προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών, επομένως, πλεονεκτεί έναντι της απευθείας μετάδοσης, τόσο από πλευράς απόδοσης όσο και από πλευράς καθυστέρησης που γίνεται αντιληπτή από την πηγή.



Εικόνα 7: Η επικοινωνία προώθησης κίνησης βοηθάει τις συσκευές με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης

Η προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών απαιτεί MAC με μοναδικά χαρακτηριστικά, τα οποία θα πρέπει να υποστηρίζουν την διανομή και την συνεργασία σε περιβάλλοντα multipoint-to-multipoint. Υπάρχουν αξιοσημείωτα ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός MAC, όπως είναι: η σωστή επιλογή της ενδιάμεσης συσκευής προώθησης κίνησης, το είδος προώθησης κίνησης που θα πρέπει να επιλεχθεί, η κοινοποίηση των συσκευών συνεργασίας, καθώς και ο σχεδιασμός της προώθησης των δεδομένων [16].

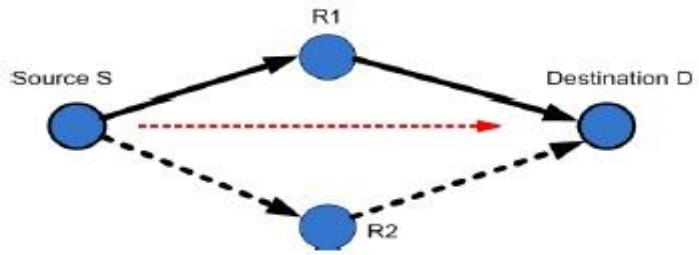
Σε ό, τι αφορά την επιλογή της ενδιάμεσης συσκευής προώθησης κίνησης, υπάρχει ένας ευρύς ορίζοντας παραμέτρων επιλογής, που βασίζεται κυρίως στις πληροφορίες του καναλιού. Τέτοιες παράμετροι είναι πολύπλοκες και ασταθείς. Επιπλέον, η επιλεγμένη συσκευή μπορεί να είναι η καλύτερη σε μια συγκεκριμένη περίπτωση, αλλά μπορεί ταυτόχρονα να είναι η χειρότερη επιλογή για τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη σχεδιασμού υβριδικών τεχνικών που επιτρέπουν την ταυτόχρονη

βελτιστοποίηση όλων των διαφορετικών τομέων των παραμέτρων. Βέβαια, λόγω της ίδιας της φύσης του ασύρματου τοπικού δικτύου υπάρχει πάντα η πιθανότητα της αποτυχίας προώθησης κίνησης λόγω της πτώσης είτε μέρους του δικτύου στο οποίο υφίσταται η επιλεγμένη συσκευή είτε της ίδιας της συσκευής.

Σε ό, τι αφορά το σχεδιασμό της προώθησης των δεδομένων: το πρώτο ζήτημα είναι η εύρεση της ενδιάμεσης συσκευής. Τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα απαιτούν μια αποτύπωση της κατάστασης του μέρους του δικτύου που ενδιαφέρει, συνήθως με βάση την ποιότητα των καναλιών. Η αποτύπωση αυτή επιτυγχάνεται με περιοδική εκπομπή (broadcast), η οποία θα πρέπει να είναι πολύ συχνή για να προλαβαίνει όλες τις μεταβολές του δικτύου, αλλά που σε κάθε περίπτωση περιορίζει την απόδοση της προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών. Ένα άλλο ζήτημα είναι ο συντονισμός των ενδιάμεσων συσκευών. Τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν επιπλέον μηνύματα ελέγχου για τη διαχείριση των συσκευών αυτών με συγκεντρωτικό τρόπο. Αυτή η κοινοποίηση των ενδιάμεσων συσκευών επηρεάζει το κέρδος της συνεργασίας τους. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο συγκεντρωτικός συντονισμός είναι ανέφικτος [7]. Πρόκληση αποτελεί ο προσδιορισμός των δυνατοτήτων συνεργασίας των ενδιάμεσων συσκευών με κατανεμημένο τρόπο.

1.6. Πιθανά οφέλη & περιορισμοί της επικοινωνίας προώθησης κίνησης

Το κύριο πλεονέκτημα της επικοινωνίας προώθησης κίνησης είναι η αύξηση της τάξης της διαφορικότητας [8]. Ένα απλό παράδειγμα αύξησης της τάξης της διαφορικότητας φαίνεται στην εικόνα 8, όπου αν η ποιότητα του καναλιού μεταξύ της πηγής S και του τελικού προορισμού D υποβαθμιστεί, η άμεση μετάδοση δεδομένων μέσω του καναλιού αυτού ενδέχεται να παρουσιάσει σφάλματα, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί σε αναμεταδόσεις. Εναλλακτικά, το κανάλι S-D μπορεί να εκμεταλλευτεί τη χωρική διαφορικότητα, μέσω της ενδιάμεσης συσκευής R1 που «ακούει» τις μεταδόσεις και προωθεί την κίνηση προς τον τελικό προορισμό. Η πηγή S μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει μια δεύτερη ενδιάμεση συσκευή R2 για βοήθεια προώθησης της κίνησης, ή και τις δύο συσκευές μαζί. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται υψηλότερη πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης σε σύγκριση με την άμεση μετάδοση. Ως εκ τούτου, η επικοινωνία προώθησης κίνησης έχει τη δυνατότητα να μετριάσει τα αποτελέσματα της εξασθένησης του καναλιού καλύτερα από το MIMO, δεδομένου ότι, σε αντίθεση με το MIMO, τα στοιχεία της εικονικής συστοιχίας κεραιών της επικοινωνίας προώθησης κίνησης είναι ξεχωριστά στον χώρο και αντιμετωπίζουν διαφορετικά επίπεδα εξασθένησης.



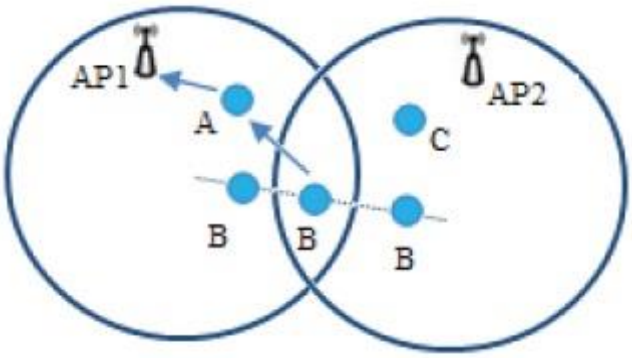
Εικόνα 8:Αύξηση της τάξης της διαφορικότητας

Η επικοινωνία προώθησης κίνησης διευκολύνει επίσης στην εξάπλωση ενός συστήματος ακόμα και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει καμία διαθέσιμη υποδομή πριν από τη δημιουργία του. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, η προώθηση κίνησης μπορεί να διευκολύνει τις επικοινωνίες, ακόμη και αν τα υφιστάμενα συστήματα επικοινωνίας, όπως για παράδειγμα τα κυψελωτά συστήματα είναι εκτός λειτουργίας.

Λόγω της προώθησης κίνησης, μια συσκευή μπορεί να έχει πρόσβαση σε ένα AP, ακόμη και μέσω μιας ή περισσοτέρων ενδιάμεσων συσκευών, επεκτείνοντας το εύρος κάλυψης και αποφεύγοντας τις μεταπομπές (handovers). Στην περίπτωση των pedestrian mobile networks, οι κινητές συσκευές (για παράδειγμα τα WLAN smartphones) που βρίσκονται στα όρια της περιοχής κάλυψης του AP, συνήθως χάνουν πάρα πολύ χρόνο στο να εκτελούν μεταπομπές σε γειτονικά AP, γεγονός που οδηγεί σε υποβάθμιση των επιδόσεων. Προς αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, μια ή περισσότερες ενδιάμεσες συσκευές μπορούν να προωθήσουν την κίνηση της συσκευής που βρίσκεται στα όρια κάλυψης του AP, επιτρέποντας έτσι στην συσκευή αυτή να έχει πάντα πρόσβαση στο ίδιο AP, αποκλείοντας τις μεταπομπές (Εικ. 9).

Οι περιορισμοί της επικοινωνίας προώθησης κίνησης μπορεί να είναι τόσο σημαντικοί όσο και τα πλεονεκτήματα της. Ως εκ τούτου, η σχεδίαση ενός δικτύου επικοινωνίας προώθησης κίνησης θα πρέπει να γίνεται με προσοχή, ώστε να επιτευχθεί η πλήρης εκμετάλλευση όλων των πλεονεκτημάτων χωρίς όμως την υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Λόγω της προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών, η επικοινωνία προώθησης κίνησης εισάγει πάντα κάποιο επιπλέον overhead και παρεμβολές σε σύγκριση με άλλους τρόπους μετάδοσης. Έτσι, τα οφέλη που προκύπτουν από τη επικοινωνία προώθησης κίνησης μπορεί να μειωθούν εάν ο μηχανισμός δεν είναι έξυπνα σχεδιασμένος. Υπάρχουν πολλοί άλλοι περιορισμοί, όπως ταυτόχρονες μεταδόσεις και κινητικότητα κ.λπ., οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των δικτύων [25]. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών συνεπάγεται επιπλέον περιορισμούς σχεδιασμού ούτως ώστε οι προωθήσεις κίνησης να μην παρεμβάλλονται με άλλες άμεσες μεταδόσεις. Αυτό απαιτεί πιο εξελιγμένο προγραμματισμό κινήσεων, καθώς στις επικοινωνίες προώθησης κίνησης θα

πρέπει να προγραμματίζεται η προώθηση κίνησης τόσων των διάφορων πηγών όσο και των ενδιάμεσων συσκευών.



Εικόνα 9: Αποφυγή ανεπιθύμητων μεταπομπών

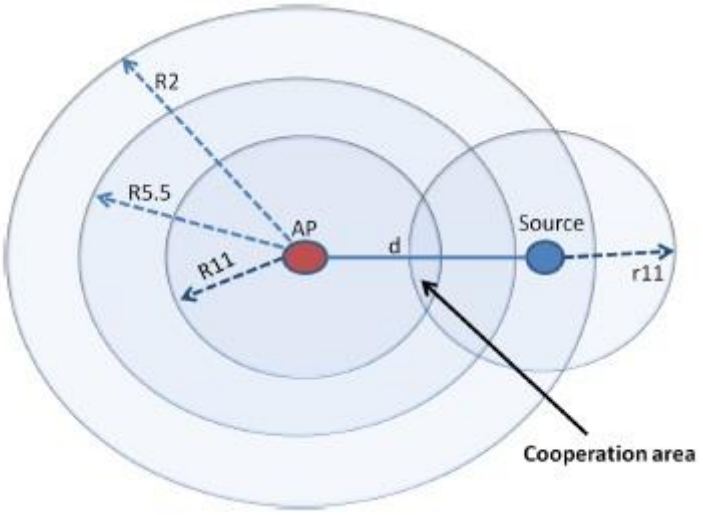
Οι χρήστες θα απέρριπταν ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο με διαφορικότητα αν το στρώμα PHY απαιτούσε χειροκίνητη ρύθμιση. Για το λόγο αυτό, ο ρόλος του στρώματος MAC είναι βασικός. Εκτός από τον έλεγχο της συνεργασίας των ενδιάμεσων συσκευών, το στρώμα MAC πρέπει να στηρίζει την ανάκαμψη από σφάλμα, τη δυναμική βελτιστοποίηση, την υποστήριξη της κινητικότητας, την επιλογή των ενδιάμεσων συσκευών για την προώθηση κίνησης και την απόφαση του ποιες συσκευές μπορούν να συνεργαστούν [25].

Η προώθηση κίνησης στο στρώμα MAC περιλαμβάνει δύο φάσεις: την επιλογή των ενδιάμεσων συσκευών και την εκπομπή μέσω των συσκευών αυτών. Οι ενδιάμεσες συσκευές μπορούν να επιλεγούν είτε από την πηγή (source-based), είτε από τον τελικό προορισμό (destination-based), είτε από τις ίδιες τις συσκευές (relay-based). Τα πρωτόκολλα στο στρώμα MAC μπορούν να ταξινομηθούν ως πρωτόκολλα πρόληψης και πρωτόκολλα αντίδρασης. Στα πρωτόκολλα πρόληψης, η προώθηση κίνησης βασίζεται σε κάποια προκαθορισμένη βέλτιστη ή τυχαία μορφή. Στην περίπτωση αυτή, η πηγή, ο τελικός προορισμός ή η δυνητική ενδιάμεση συσκευή αντικαθιστούν τη χαμηλής ταχύτητας απευθείας μετάδοση με μια μεγάλης ταχύτητας, απλής αναπήδης προώθηση κίνησης, με στόχο τη βελτίωση της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων [26]. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι κρίσιμου χρόνου και επιβαρύνουν με μεγαλύτερα overheads. Επίσης απαιτούν συχνή ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την έγκαιρη παράδοση των δεδομένων. Αντίθετα, στα πρωτόκολλα αντίδρασης, η επικοινωνία προώθησης κίνησης μεταξύ των συσκευών ξεκινάει με ένα Negative ACK (NACK) λόγω σύγκρουσης ή σφάλματος [24]. Τα πρωτόκολλα αντίδρασης είναι κατάλληλα για ανεκτικές σε καθυστερήσεις εφαρμογές και επιβαρύνουν με μικρότερα overheads.

Στην εικόνα 10 απεικονίζεται ένα βασικό σύστημα 802.11b όπου οι συσκευές έχουν διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης ανάλογα με την απόστασή τους από το AP. Η τεχνική της συνεργασίας στο MAC επιτρέπει στην πηγή να βρει μια ενδιάμεση συσκευή και να προωθήσει τα δεδομένα μέσω αυτής. Για να επιλεγεί η συσκευή αυτή, θα πρέπει να είναι εντός της περιοχής συνεργασίας, ώστε να μπορέσει να διορθώσει το πρόβλημα της χαμηλής ταχύτητας μετάδοσης άλλων συσκευών. Όπως φαίνεται στην εικόνα 10, R11 είναι η απόσταση από το AP που δημιουργεί μια περιοχή εντός της οποίας η ταχύτητα μετάδοσης είναι 11 Mbps, r11 είναι η απόσταση από την πηγή που δημιουργεί μια περιοχή εντός της οποίας η ταχύτητα μετάδοσης είναι 11 Mbps και d είναι η απόσταση μεταξύ πηγής και AP. Ως περιοχή συνεργασίας ορίζεται το σημείο τομής των δύο κύκλων (R11 και r11) και δίνεται από την σχέση [27]:

$$\Pi\varepsilon\rho\iota o\chi\acute{\eta}\Sigma\upsilon\nu\varepsilon\rho\gamma\alpha\sigma\acute{\iota}\alpha\varsigma = r^2\cos^{-1}\left(\frac{d^2+r^2+R^2}{2dR}\right)+R^2\cos^{-1}\left(\frac{d^2+R^2+r^2}{2dR}\right)-\frac{1}{2}\sqrt{(-d+r+R)(d+r-R)(d-r+R)(d+r+R)} \quad (6)$$

Η προώθηση κίνησης που φαίνεται στην εικόνα 10 μπορεί επίσης να επιβαρύνει με κάποια επιπλέον overheads, κυρίως λόγω της υψηλών επιπέδων παρεμβολής. Στην περίπτωση αυτή, η παρεμβολή που προκαλούν οι μεταδόσεις των ενδιάμεσων συσκευών θα είναι, στην καλύτερη περίπτωση, ευθέως ανάλογη προς τον αριθμό των συσκευών. Η κατάσταση μπορεί να επιδεινωθεί στην περίπτωση δικτύων πολλαπλών αναπηδήσεων, όπου η χρήση της προώθησης κίνησης hop-by-hop θα αυξήσει το κόστος του δικτύου (π.χ., από τον αριθμό των μεταδόσεων).



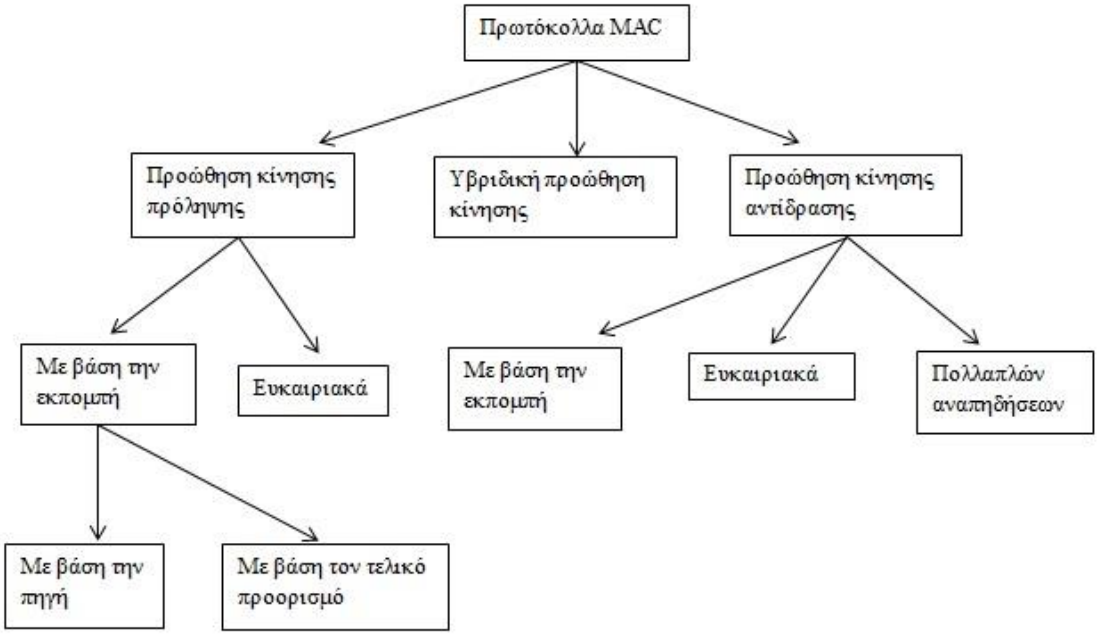
Εικόνα 10: Παράδειγμα δικτύου 802.11b

2.1. Ταξινόμηση των πρωτοκόλλων του στρώματος MAC

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα πρωτόκολλα στο στρώμα MAC μπορούν να ταξινομηθούν ως πρωτόκολλα πρόληψης και πρωτόκολλα αντίδρασης. Τα πρωτόκολλα πρόληψης λειτουργούν όταν το άμεσο link μεταξύ της πηγής και του τελικού προορισμού είναι ενεργό, ενώ τα πρωτόκολλα αντίδρασης ενεργοποιούνται όταν πέσει το link αυτό. Επομένως, η προώθηση κίνησης πρόληψης (proactive relaying) αποσκοπεί στην αύξηση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων, ενώ η προώθηση κίνησης αντίδρασης (reactive relaying) έχει ως στόχο να μειώσει την υποβάθμιση των δικτύων αποφεύγοντας τις επανεκπομπές.

Η προώθηση κίνησης πρόληψης μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε πρωτόκολλα με βάση την εκπομπή (broadcast-based protocols) και σε ευκαιριακά πρωτόκολλα (opportunistic protocols), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 11. Όπως εξηγεί και το ίδιο τους το όνομα, τα

πρωτόκολλα broadcast-based κάνουν χρήση της broadcasting φύσης του ασύρματου μέσου και προσφέρουν περισσότερο έλεγχο λόγω του συγκεντρωτικού τους χαρακτήρα. Αντίθετα, η προώθηση κίνησης αντίδρασης είναι εκείνη στην οποία οι ενδιάμεσες συσκευές μπορούν να συνεργαστούν ανεξάρτητα εντός συγκεκριμένων χρονικών περιορισμών και κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Μια τέτοιου είδους προώθηση κίνησης δεν απαιτεί επιπλέον μηνύματα ελέγχου.



Εικόνα 11: Ταξινόμηση πρωτοκόλλων MAC

Τα πρωτόκολλα αντίδρασης μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε πρωτόκολλα με βάση την εκπομπή, σε ευκαιριακά πρωτόκολλα και σε πρωτόκολλα πολλαπλών αναπηδήσεων (Εικ.11). Από την ταξινόμηση των MAC πρωτοκόλλων της εικόνας 11, είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στα broadcast-based πρωτόκολλα λόγω της εύκολης υλοποίησης τους και της συμβατότητάς τους με παλαιότερες εκδόσεις.

Στην επόμενη ενότητα, δίνονται λεπτομέρειες ορισμένων υφιστάμενων πρωτοκόλλων.

2.2. Πρωτόκολλα προώθησης κίνησης

Σε γενικές γραμμές, και οι δύο προσεγγίσεις, πρόληψης και αντίδρασης, έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, τα οποία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από μεμονωμένους μηχανισμούς. Ως εκ τούτου, η μελέτη των πρωτοκόλλων είναι σημαντικό να γίνεται ανεξάρτητα από την κατηγορία τους. Στη συνέχεια περιγράφονται κάποια MAC πρωτόκολλα, σύμφωνα με την ταξινόμηση της εικόνας 11.

2.2.1. Πρωτόκολλα με βάση την εκπομπή

Σε αυτό το είδος των πρωτοκόλλων, οι πηγές, ο τελικός προορισμός ή οι εν δυνάμει ενδιάμεσες συσκευές προώθησης κίνησης διατηρούν κανονικά ένα πίνακα ο οποίος ενημερώνεται περιοδικά με βάση το broadcasting. Οι περιορισμοί των πρωτοκόλλων αυτών είναι οι περιοδικές εκπομπές, η συντήρηση του πίνακα και το επιπλέον overhead ελέγχου που επηρεάζει την απόδοση. Τα broadcast-based πρωτόκολλα μπορούν να είναι πρωτόκολλα πρόληψης, καθώς και αντίδρασης.

i) Πρωτόκολλο rDCF: Αναπτύχθηκε από τους Zhu και Cao [28], βασίζεται στο πρωτόκολλο λειτουργίας κατανεμημένου συντονισμού (DCF) και ενεργοποιείται από τις ενδιάμεσες συσκευές (relay enabled). Σύμφωνα με το rDCF, χρησιμοποιείται ένα υψηλής ταχύτητας προώθησης δεδομένων και διπλής αναπήδησης path αντί του χαμηλής ταχύτητας, άμεσου path μεταξύ της πηγής και του τελικού προορισμού. Αν για μια δεδομένη ροή μεταξύ ενός ζεύγους αποστολέα και παραλήπτη, με μετρημένη την ποιότητα του καναλιού, μία ενδιάμεση συσκευή διαπιστώσει ότι τα δεδομένα μπορούν να προωθηθούν ταχύτερα, τότε προσθέτει την ταυτότητα (π.χ. την Διεύθυνση MAC) του αποστολέα και του παραλήπτη στη λίστα επιθυμίας της. Σε τακτά χρονικά διαστήματα, κάθε συσκευή διαφημίζει την λίστα επιθυμίας της στους μιας αναπήδησης γείτονές της, απ' όπου η πηγή επιλέγει μια ενδιάμεση συσκευή. Το rDCF προτείνει ένα τριγωνικό μηχανισμό χειραψίας για την προώθηση κίνησης μεταξύ πηγής-ενδιάμεσης συσκευής-τελικού προορισμού. Πρώτα, η πηγή στέλνει ένα αίτημα Relay Request To Send (RRTS). Μετά την παραλαβή του RRTS, η ενδιάμεση συσκευή και ο τελικός προορισμός μπορούν να μετρήσουν την ποιότητα του καναλιού. Στη συνέχεια, η ενδιάμεση συσκευή στέλνει ένα άλλο RRTS προς τον τελικό προορισμό στο οποίο περιέχεται και η πληροφορία μιας piggybacked μέτρησης του καναλιού πηγής-ενδιάμεσης συσκευής. Ο τελικός προορισμός μετρά την ποιότητα του καναλιού ενδιάμεσης συσκευής-τελικού προορισμού και στέλνει Relay Clear To Send (RCTS) στην πηγή, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών της ταχύτητας των καναλιών πηγής-ενδιάμεσης συσκευής και ενδιάμεσης συσκευής-τελικού προορισμού.

Το rDCF είναι κατάλληλο μόνο εάν το μέγεθος του frame είναι μεγαλύτερο από 400 bytes. Διαφορετικά, η επίδοσή του είναι χειρότερη σε σύγκριση με το DCF, λόγω του σχετικά μεγαλύτερου overhead του. Ένα άλλο μειονέκτημα του rDCF είναι ότι όταν η ενδιάμεση συσκευή προωθεί το data frame, δεν περιλαμβάνει το πεδίο της διάρκειας προώθησης, η έλλειψη του οποίου αυξάνει την πιθανότητα συγκρούσεων.

ii) Πρωτόκολλο CoopMAC: Στο CoopMAC [29], η πηγή χρησιμοποιεί μια ενδιάμεση συσκευή που διατηρεί ένα σχετικά καλό κανάλι με την πηγή και τον τελικό προορισμό. Αντί της άμεσης αποστολής των frames στον τελικό προορισμό μέσω ενός καναλιού με χαμηλή

ταχύτητα μετάδοσης, η πηγή κάνει χρήση ενός υψηλής ταχύτητας προώθησης δεδομένων και διπλής αναπήδησης path για να προωθήσει τα δεδομένα στον τελικό προορισμό μέσω μιας ενδιάμεσης συσκευής. Με βάση την CSI που εκπέμπεται από τις ενδιάμεσες συσκευές, οι πηγές ενημερώνουν έναν τοπικό πίνακα (τον cooptable), που χρησιμοποιείται για να επιλεγεί η καταλληλότερη συσκευή για προώθηση κίνησης. Το CoopMAC πραγματοποιεί handshakes 3 δρόμων, οι οποίες απαιτούν την αποστολή ενός Helper ready To Select (HTS) μηνύματος ελέγχου από την επιλεγμένη ενδιάμεση συσκευή μεταξύ των μηνυμάτων RTS και CTS. Πρώτα, η πηγή στέλνει ένα μήνυμα Cooperative RTS (CoopRTS) με το ID της επιλεγμένης ενδιάμεσης συσκευής. Αν η επιλεγμένη συσκευή είναι πρόθυμη να συνεργαστεί, τότε στέλνει ένα μήνυμα HTS πίσω στην πηγή. Εάν ο τελικός προορισμός «ακούσει» ένα μήνυμα HTS, μεταδίδει ένα CTS. Μετά την λήψη του CTS, η πηγή στέλνει το data frame στον τελικό προορισμό μέσω της επιλεγμένης ενδιάμεσης συσκευής.

iii) Πρωτόκολλο CODE: Χρησιμοποιεί δύο ενδιάμεσες συσκευές για να σχηματίσει την εικονική διάταξη κεραίας και επιπρόσθετα κάνει χρήση της τεχνικής της κωδικοποίησης του δικτύου φυσικού στρώματος για την επίτευξη του επιθυμητού κέρδους [30]. Στην περίπτωση αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ της πηγής και του τελικού προορισμού, η κωδικοποίηση του δικτύου εφαρμόζεται στην ενδιάμεση συσκευή προώθησης κίνησης για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Με βάση το CODE, όλοι οι κόμβοι «ακούν» τα RTS/CTS frames και σε περίπτωση που διαπιστώσουν ότι μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα γρηγορότερα από την πηγή, προσθέτουν την ταυτότητα της πηγής και του τελικού προορισμού στη λίστα επιθυμίας τους. Μόλις η πηγή βρει ότι η διεύθυνσή της βρίσκεται στην λίστα επιθυμίας κάποιας ή κάποιων ενδιάμεσων συσκευών, την ή τις προσθέτει στον πίνακα συνεργασίας της.

iv) Πρωτόκολλο FairMAC: Ασχολείται με το ενεργειακό κόστος της συνεργασίας των συσκευών προώθησης κίνησης σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο, δεδομένου ότι υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της ενέργειας ανά μεταδιδόμενου bit και της απόδοσης που επιτυγχάνεται [31]. Το FairMAC, επιτρέπει την επιλογή του επιθυμητού παράγοντα συνεργασίας, ο οποίος καθορίζει το όριο των frames άλλης συσκευής που μπορούν να προωθηθούν από την ενδιάμεση συσκευή σε σχέση με τα δικά της δεδομένα που μεταδίδει.

v) Πρωτόκολλο Relay-Aided Medium Access (RAMA): Προτείνει την μετάδοση των δεδομένων με βάση την ενδιάμεση συσκευή προώθησης κίνησης [32]. Σκοπός του είναι η βελτίωση της απόδοσης και η μείωση του χρόνου μετάδοσης. Το RAMA αποτελείται από δύο μέρη: το πρώτο μέρος περιλαμβάνει την πρόσκληση η οποία χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ενδιάμεσης συσκευής και το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει την προώθηση των δεδομένων. Το RAMA επιτρέπει τη χρήση μίας μόνο ενδιάμεσης συσκευής για προώθηση

κίνησης και σε περίπτωση σύγκρουσης της πρόσκλησης, η ενδιάμεση συσκευή δεν χρειάζεται να μεταδώσει και να περιμένει για την επόμενη μετάδοση.

vi) Πρωτόκολλο Opportunistic Retransmission Protocol (PRO): Στο PRO μία εν δυνάμει ενδιάμεση συσκευή προώθησης κίνησης μπορεί να προωθήσει δεδομένα εξ ονόματος της πηγής όταν ανιχνεύει μια αποτυχημένη μετάδοση [33]. Στο PRO οι εν δυνάμει ενδιάμεσες συσκευές εκπέμπουν πληροφορίες για τα κανάλια τους, επιτρέποντας έτσι σε άλλες συσκευές να ρυθμίσουν το επίπεδο προτεραιότητάς τους. Με βάση το επίπεδο αυτό, στη συνέχεια, επιλέγουν το παράθυρο ανταγωνισμού τους (contention window) προκειμένου να αυξήσουν τις πιθανότητες της αναμετάδοσης. Έτσι, κάθε συσκευή διατηρεί έναν πίνακα στον οποίο περιέχονται οι πληροφορίες του καναλιού (επίπεδα προτεραιότητας) των γειτόνων. Μια τέτοια λειτουργία διατήρησης καταναλώνει ενέργεια, πόρους και επηρεάζει την χωρητικότητα του δικτύου. Ένα άλλο πρόβλημα του PRO είναι η εμφάνιση περιττών αναμεταδόσεων, αν οι επιλέξιμες συσκευές δεν «ακούσουν» ένα ACK frame επιτυχούς μετάδοσης.

vii) Πρωτόκολλο Cooperative Diversity MAC (CD-MAC): Στο CD-MAC η προώθηση κίνησης γίνεται μέσω μιας ενδιάμεσης συσκευής όταν πέσει το απ' ευθείας link [34]. Πρώτα η πηγή και η προεπιλεγμένη της συσκευή στέλνουν ένα Cooperative RTS (CRTS) στον τελικό προορισμό. Ο τελικός προορισμός και η προεπιλεγμένη του συσκευή απαντούν με ένα Cooperative CTS (CCTS). Μετά την παραλαβή του CCTS, η πηγή και η ενδιάμεση συσκευή της προωθούν τα δεδομένα προς τον τελικό προορισμό και την ενδιάμεση συσκευή του. Μετά την λήψη των δεδομένων, ο τελικός προορισμός και η ενδιάμεση συσκευή του στέλνουν ένα Cooperative ACK (CACK). Όπως γίνεται κατανοητό, το CD-MAC επιβαρύνει με πολύ μεγάλο overhead σημάτων ελέγχου, καθώς η πηγή, ο τελικός προορισμός και οι ενδιάμεσες συσκευές επαναλαμβάνουν ολόκληρα τα frames ελέγχου και δεδομένων σε διαφορετικούς κώδικες.

2.2.2. Ευκαιριακά Πρωτόκολλα

Τα πρωτόκολλα αυτά δεν διατηρούν πίνακες και, ως εκ τούτου, μία συσκευή μπορεί να προωθήσει δεδομένα ευκαιριακά χωρίς προηγούμενο συντονισμό.

i) Πρωτόκολλο Opportunistic Relaying Protocol (ORP): Είναι μια λύση προώθησης κίνησης όπου οι κόμβοι είναι σε θέση να αυξήσουν αποτελεσματικά το ρυθμό μετάδοσής τους χρησιμοποιώντας διπλής αναπήδησης, υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων links [7]. Το ORP δεν βασίζεται στον Received Signal Strength Indicator (RSSI) για την επιλογή των ενδιάμεσων συσκευών. Διαθέτει τα δεδομένα ευκαιριακά για προώθηση και όλες οι συσκευές προσπαθούν να τα προωθήσουν εντός ενός χρονικού περιορισμού. Μετά την προώθηση κίνησης, οι ενδιάμεσες συσκευές κάνουν πίσω, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα του

πρωτοκόλλου. Άλλο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η πηγή δεν γνωρίζει τη διαθεσιμότητα των συσκευών που μπορούν να προωθήσουν δεδομένα και επομένως δεν είναι σε θέση να γνωρίζει ούτε την κατάσταση των καναλιών πηγής-ενδιάμεσης συσκευής και ενδιάμεσης συσκευής-τελικού προορισμού.

ii) Πρωτόκολλο Cooperative Communication MAC (CMAC): Εισαγάγει χωρική διαφορικότητα μέσω της συνεργασίας των χρηστών [28]. Στην περίπτωση του CMAC κάθε κόμβος αποθηκεύει το data frame της πηγής. Αν δεν «ακουστεί» κάποιο ACK, η ενδιάμεση συσκευή προωθεί το αποθηκευμένο data frame για λογαριασμό της πηγής. Κύριο μειονέκτημα του CMAC είναι η επιβάρυνση του overhead, λόγω της χρήσης των πρόσθετων ουρών και των εκτιμήσεων των καναλιών.

2.2.3. Πρωτόκολλα πολλαπλών αναπηδήσεων

Στην προσέγγιση συνεργασίας two-for-one [36], η πολλαπλή διαστρωμάτωση (cross layering) χρησιμοποιείται για να παρέχει πληροφορίες δρομολόγησης στο στρώμα MAC, ώστε να επιτρέπει την ταυτόχρονη προώθηση κίνησης άνω των δύο αναπηδήσεων. Η συνεργασία two-for-one είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την επίτευξη υψηλής διαφορικότητας με μικρή επέκταση του εύρους ζώνης. Σε δεδομένο ρυθμό σφαλμάτων πακέτων (Packet Error Rate - PER), η απολαβή της προσέγγισης two-for-one μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της ισχύος μετάδοσης, βελτιώνοντας έτσι την χωρητικότητα του δικτύου. Ωστόσο, παρουσιάζει το πρόβλημα των περιττών μεταδόσεων.

Μια άλλη προσέγγιση προώθησης κίνησης πολλαπλών αναπηδήσεων προτείνεται από τους H. Adam & συνεργάτες [37]. Εκμεταλλεύεται τη συνέργεια των συσκευών προώθησης κίνησης μονής αναπήδησης (που χρησιμοποιούνται για μία μόνο μετάδοση) και των συσκευών προώθησης κίνησης πολλαπλών αναπηδήσεων (που χρησιμοποιούνται για δύο μεταδόσεις ταυτόχρονα), λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που παρέχονται από ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης ζεύξης (link-state routing protocol). Το σενάριο που χρησιμοποιείται αποκλείει μια δυνητική (ακόμη και αν είναι αδύναμη) άμεση ζεύξη μεταξύ της πηγής και του τελικού προορισμού. Όπως όμως συμβαίνει και με την πρόταση των H Lichte & συνεργάτες [36], η προσέγγιση αυτή εξαρτάται από μια τοπολογική άποψη του δικτύου, που παρέχεται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης.

2.2.4. Υβριδική προώθηση κίνησης

Η υβριδική προώθηση κίνησης βελτιώνει την απόδοση των ασύρματων δικτύων μέσω του αποτελεσματικού συνδυασμού της προώθησης κίνησης πρόληψης και της προώθησης κίνησης αντίδρασης [38]. Στις υβριδικές προσεγγίσεις όπως το RelaySpot [39], μια συσκευή επιλέγεται για προώθηση κίνησης χρησιμοποιώντας ευκαιριακό τρόπο χωρίς όμως την επιβάρυνση κάποιου overhead εκπομπής. Η συσκευή επιλέγεται χωρίς την ανάγκη

διατήρησης κάποιου πίνακα και η προώθηση κίνησης πραγματοποιείται χωρίς περαιτέρω handshake μηνύματα. Πιθανή λάθος επιλογή συσκευής προώθησης κίνησης ή πέσιμο της συσκευής προσαρμόζονται δυναμικά, χωρίς την ανάγκη αναμονής της διαδικασίας επιλογής νέας συσκευής. Ως εκ τούτου, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η εν λόγω υβριδική συμπεριφορά έχει τη δυνατότητα να διορθώσει τα μειονεκτήματα που εμφανίζονται στις προηγούμενες τεχνικές.

Το RelaySpot αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- *Ευκαιριακή επιλογή συσκευής προώθησης κίνησης:* Οι ενδιάμεσες συσκευές μπορούν να προωθήσουν κίνηση αν υπάρξουν οι κατάλληλες τοπικές ευνοϊκές συνθήκες (π.χ., δεν υπάρχει ταυτόχρονη κίνηση) και μετά την ανίχνευση μίας εκ των δύο περιπτώσεων: i) πτώση της απευθείας επικοινωνίας πηγής-τελικού προορισμού, ii) η απευθείας μετάδοση έχει χαμηλή ταχύτητα (αναλύοντας το ρυθμό ασύρματης προώθησης των δεδομένων)
- *Προγραμματισμός προώθησης κίνησης συνεργασίας:* Ο τελικός προορισμός είναι σε θέση να συνεργαστεί με την διαδικασία επιλογής ενδιάμεσης συσκευής προώθησης κίνησης, επιλέγοντας μία από τις εν δυνάμει συσκευές προώθησης κίνησης, με βάση την κατάσταση στην οποία βρίσκονται αυτές. Στο RelaySpot, ο μηχανισμός προγραμματισμού προώθησης κίνησης συνεργασίας μπορεί να δημιουργήσει υψηλότερη από τη διπλάσια διαφορικότητα, επιλέγοντας περισσότερες από μία συσκευές
- *Ενεργοποίηση συσκευών προώθησης κίνησης:* Αυτή η λειτουργία έχει ως στόχο να αντισταθμίσει αποτυχημένες προωθήσεις κίνησης από τις ενδιάμεσες συσκευές. Η επιλογή μιας συσκευής προώθησης κίνησης αντιμετωπίζει πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης που είναι δύσκολο να λυθούν, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να είναι δύσκολο να βρεθεί η καταλληλότερη συσκευή από το σύνολο των εν δυνάμει συσκευών προώθησης κίνησης μόνο βάσει του τελικού προορισμού. Ως εκ τούτου, με στόχο να είναι κατάλληλο για δυναμικά σενάρια, το RelaySpot επιτρέπει στον τελικό προορισμό να επιλέξει την καλύτερη δυνατή ενδιάμεση συσκευή ευκαιριακής προώθησης κίνησης ακόμη και αν δεν είναι η βέλτιστη (π.χ., με βάση το CSI). Προκειμένου να διατηρηθεί ένα καλό επίπεδο ποιότητας σε περίπτωση κακής απόφασης του τελικού προορισμού, το RelaySpot επιτρέπει στις εν δυνάμει συσκευές να αναλάβουν τον έλεγχο της προώθησης κίνησης, ζητώντας από την πηγή να αλλάξει ενδιάμεση συσκευή για την προώθηση των επόμενων data frames.

Το RelaySpot μπορεί επίσης να επεκταθεί και σε πρωτόκολλο πολλαπλών αναπηδήσεων [14] με τη χρήση αλυσιδωτής προώθησης κίνησης. Με τον τρόπο αυτό, η προώθηση κίνησης

ενεργοποιείται πάνω στη ζεύξη συσκευής-τελικού προορισμού, γεγονός που οδηγεί σε σειριακή προώθηση κίνησης, δηλαδή, προώθηση κίνησης πολλαπλών αναπηδήσεων. Μια τέτοια προώθηση κίνησης μπορεί να είναι ωφέλιμη μόνο αν η ενδιάμεση συσκευή είναι ενήμερη για την επόμενη αναπήδηση. Ως εκ τούτου, η συσκευή μπορεί να προωθήσει το frame στην επόμενη αναπήδηση. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μετριαστεί η πολυπλοκότητα της προώθησης κίνησης hop-by-hop. Στην αλυσιδωτή προώθηση κίνησης, ο τελικός προορισμός μπορεί να λαμβάνει περισσότερα από δύο ανεξάρτητα σήματα του ίδιου frame (π.χ., απευθείας μέσω της πηγής, μέσω της ενδιάμεσης συσκευής που προσδιορίζεται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης και μέσω της επιλεγμένης συσκευής προώθησης κίνησης). Αυτή η επιπλέον χωρική διαφορικότητα αυξάνει την αντοχή και την απόδοση του δικτύου. Ωστόσο, το τίμημα είναι το επιπλέον overhead που μεταφέρει περιττές πληροφορίες και η πολλαπλή διαστρωμάτωση που απαιτείται για τη συλλογή των πληροφοριών δρομολόγησης και που δεν μπορεί να ενημερώνεται με τη συχνότητα που απαιτείται για να αντιδράσει ανάλογα σε περιβάλλοντα με φορητές συσκευές.

2.3. Λειτουργίες προώθησης κίνησης

Όλες οι προτεινόμενες τεχνικές έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, και καμία δεν μπορεί να θεωρηθεί ανώτερη από τις άλλες. Στην ενότητα αυτή, θα αναλυθούν οι κοινές λειτουργίες που ακολουθούν τα πρωτόκολλα MAC. Η διαδικασία προώθησης κίνησης από συνεργαζόμενες συσκευές περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις [40]:

- Ανακάλυψη και αίτηση
- Διαπραγμάτευση
- Συναλλαγή
- Αξιολόγηση και ανατροφοδότηση

Η πρώτη φάση αποτελεί την έναρξη της συνεργασίας, η διαπραγμάτευση αναφέρεται στις συνθήκες, η συναλλαγή αναφέρεται στις ανταμοιβές, ενώ η τελευταία φάση αναφέρεται στην ποιότητα της εμπειρίας.

Από την ανάλυση των MAC πρωτοκόλλων γίνεται σαφές ότι η προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών φέρνει οφέλη στη λειτουργία των ασύρματων δικτύων, αλλά η χρήση της σε μεγάλα δίκτυα μπορεί να εισαγάγει ανεπιθύμητα μεγάλα overhead και πολυπλοκότητα. Η πολυπλοκότητα οφείλεται κυρίως στον αριθμό των εκτιμήσεων των καναλιών, ενώ το overhead οφείλεται κυρίως στα πολλαπλά αντίγραφα των μηνυμάτων δεδομένων και των σημάτων ανάδρασης. Η πολυπλοκότητα μπορεί επίσης να αυξηθεί από τον αριθμό των αποτυχημένων προσπαθειών προώθησης κίνησης των συσκευών. Επιπλέον, η

αναμονή της βέλτιστης επιλογής ενδιάμεσης συσκευής για προώθηση κίνησης υποβαθμίζει τη συνολική απόδοση του δικτύου και μειώνει τη χωρητικότητά του.

Πριν από την επιλογή της κατάλληλης τεχνικής προώθησης κίνησης σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο, θα πρέπει πρώτα να διευκρινιστούν κάποια στοιχεία, όπως για παράδειγμα, το αν είναι όντως απαραίτητη η χρήση τέτοιου είδους προώθησης κίνησης για το εν λόγω δίκτυο, το πως θα πρέπει να γίνει ο συντονισμός και το ποιες συσκευές είναι σε θέση να λειτουργήσουν ως ενδιάμεσες συσκευές προώθησης κίνησης. Όσον αφορά την ανάγκη χρήσης της προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών σε ένα 802.11 δίκτυο, θα πρέπει να γίνει μια σύγκριση των αποδόσεων μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν από τις προτεινόμενες μεθόδους που κάνουν χρήση της χωρικής διαφορικότητας σε σχέση με την απόδοση μετάδοσης της απευθείας ζεύξης. Ο συντονισμός μεταξύ των ενδιάμεσων συσκευών μπορεί να γίνει χωρίς ή με ελάχιστη ανάδραση. Η επιλογή της βέλτιστης τεχνικής προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών που μπορεί να πετύχει μια καλή ισορροπία ανάμεσα στις παρεμβολές του δικτύου και την απόδοση μετάδοσης, είναι σημαντικό να ξεκινήσει με τη διερεύνηση της επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων των εν δυνάμει ενδιάμεσων συσκευών καθώς και με την εξέταση των σεναρίων αξιολόγησης.

Στις επόμενες υποενότητες θα εξεταστούν δύο βασικά στοιχεία της προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών, όπως είναι η επιλογή της καταλληλότερης συσκευής και η μετάδοση συνεργασίας.

2.3.1. Επιλογή της καταλληλότερης συσκευής

Στην προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών, η διαδικασία επιλογής της κατάλληλης συσκευής απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, δεδομένου ότι έχει άμεση επίδραση τόσο στην απόδοση του δικτύου όσο και στην ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων. Ανεξάρτητα με το αν η τεχνική προώθησης κίνησης λειτουργεί μόνο στο στρώμα ζεύξης ή σε συνδυασμό με τεχνικές διαφορικής συνεργασίας στο φυσικό στρώμα, η απόδοση της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας επιλογής μιας ή περισσότερων συσκευών προώθησης κίνησης.

Είναι σαφές ότι η μεγάλη πρόκληση της προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών είναι η επιλογή μιας συσκευής, ή σύνολο συσκευών, η οποία μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά τη μετάδοση δεδομένων. Παρά το γεγονός ότι τα περισσότερα από τα σημερινά συστήματα εφαρμόζουν μια λειτουργία κάτω από ένα AP, οι μηχανισμοί επιλογής συσκευής προώθησης κίνησης θα πρέπει να καθορίζονται προσεκτικά και με την σκέψη διαχείρισης μεγάλων ασύρματων δικτύων. Ένας λόγος είναι ο αντίκτυπος που μπορεί να έχει μια συσκευή προώθησης κίνησης στις ταυτόχρονες μεταδόσεις.

Το πρώτο θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την ανάλυση των μηχανισμών επιλογής των καταλληλότερων συσκευών προώθησης κίνησης σχετίζεται με τα κριτήρια επιλογής. Στη βιβλιογραφία, τα πιο κοινά κριτήρια είναι: το CSI, το SNR και το BER. Δεδομένου ότι αυτές οι παράμετροι πρέπει να μετρώνται στις ζεύξεις αποστολέα-ενδιάμεσης συσκευής και ενδιάμεσης συσκευής-παραλήπτη, η επιλογή της καταλληλότερης συσκευής μπορεί να απαιτεί την ανταλλαγή μετα-δεδομένων, συνήθως μεταφερόμενων εντός των RTS και CTS frames.

Το δεύτερο θέμα είναι η επίπτωση στο σύνολο του δικτύου. Κανονικά, οι συσκευές προώθησης κίνησης επιλέγονται για τη βελτίωση της απόδοσης της επικοινωνίας πηγής-τελικού προορισμού [29], αλλά συνήθως δεν λαμβάνεται καμία μέριμνα για τις επιπτώσεις μιας τέτοιας επιλογής πάνω στη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της πιθανότητας παρεμπόδισης της μετάδοσης και στη δημιουργία επιπλέον παρεμβολών.

Σε ό, τι αφορά το επίπεδο της αλληλεπίδρασης, οι μηχανισμοί επιλογής συσκευών προώθησης κίνησης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες [41]:

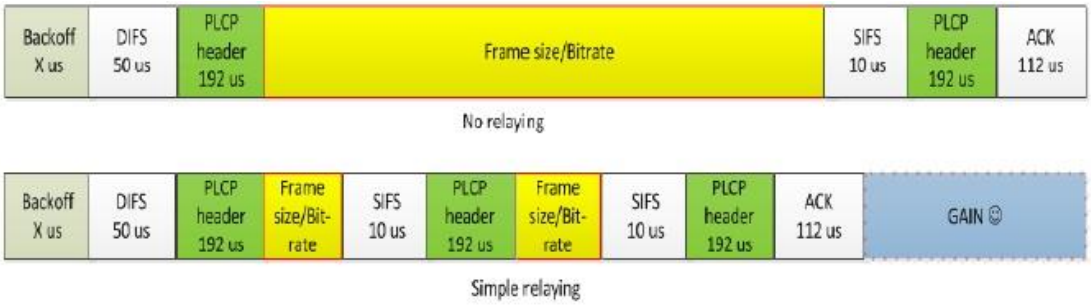
- Κατανεμημένη ή Ευκαιριακή Επιλογή Συσκευής (Distributed or Opportunistic Relay Selection – ORS)
- Κεντρική Επιλογή Συσκευής (Centralized Relay Selection - CRS)

Με την ORS, κάθε εν δυνάμει συσκευή προώθησης κίνησης αποφασίζει για τα frames που θα προωθεί, με βάση τις πληροφορίες που έχει σχετικά με το δίκτυο. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να οδηγήσει σε επιλογή περισσοτέρων της μιας συσκευής προώθησης κίνησης, γεγονός που καταρχήν οδηγεί σε έναν ανταγωνισμό των συσκευών για το ασύρματο μέσο και τελικά παρουσιάζει υψηλή πιθανότητα συγκρούσεων.

Ο μηχανισμός CRS περιλαμβάνει δύο φάσεις: Στην πρώτη φάση κάθε συσκευή εκπέμπει την προθυμία της να προωθήσει κίνηση καθώς και τοπικές πληροφορίες που θα είναι χρήσιμες για την επιλογή της. Αυτές τις πληροφορίες τις «ακούνε» άλλες συσκευές, οι οποίες μπορεί στη συνέχεια να συμμετάσχουν στην επιλογή μιας ή περισσοτέρων συσκευών προώθησης κίνησης σε μια δεύτερη φάση. Ένα μειονέκτημα του μηχανισμού αυτού είναι η πιθανή έλλειψη συγχρονισμού μεταξύ των δύο φάσεων. Ως εκ τούτου, μια συσκευή που επιλέχθηκε για προώθηση κίνησης μπορεί να μην είναι διαθέσιμη κατά τη στιγμή που θα πρέπει να κάνει προώθηση δεδομένων, λόγω κινητικότητας ή έλλειψης ενέργειας. Ένα άλλο πρόβλημα αυτού του μηχανισμού είναι η περιοδική εκπομπή και τα επιπλέον σήματα handshake που μπορεί να περιορίσουν την αποτελεσματικότητα του δικτύου.

2.3.2. Μετάδοση συνεργασίας

Σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο δεν είναι σίγουρο ότι μια πηγή θα χρειάζεται συνέχεια την βοήθεια μιας ενδιάμεσης συσκευής προώθησης κίνησης, λόγω της ποικιλομορφίας που παρουσιάζει η κατάσταση ενός ασύρματου καναλιού στη διάρκεια του χρόνου. Ως εκ τούτου, το πρώτο ζήτημα που τίθεται είναι το πότε θα πρέπει να ενεργοποιείται η μετάδοση συνεργασίας. Για την έναρξη της συνεργασίας απαιτούνται μηχανισμοί γνωστοποίησης και επομένως το επιπλέον overhead θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την απόφαση σχετικά με το αν πρέπει ή όχι να χρησιμοποιηθεί προώθηση κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών. Όπως, βέβαια έχει αναφερθεί, μια τέτοια επιλογή θα πρέπει να γίνεται μέσα από την σύγκριση των περιπτώσεων χρήσης προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσων συσκευών ή όχι από την άποψη της επάρκειας και του κόστους.



Εικόνα 12:Κέρδος απλής προώθησης κίνησης

Η προώθηση κίνησης περιλαμβάνει τη μετάδοση δύο, διαχωρισμένων στο χώρο και στο χρόνο, data frames. Ως εκ τούτου, εισάγει overhead το οποίο μεγαλώνει λόγω πρόσθετων μηνυμάτων ελέγχου. Εντούτοις, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική απολαβή με προσεκτική επιλογή της διάρκειας δέσμευσης και του χρονισμού back-off. Στην εικόνα 12 απεικονίζεται η απολαβή της μετάδοσης συνεργασίας σε δίκτυο 802.11 (όταν δεν υπάρχει κανένα επιπλέον μήνυμα ελέγχου). Όπως φαίνεται στην εικόνα 12 μια κανονική μετάδοση δεδομένων με ACK χρειάζεται περισσότερο χρόνο για την αποστολή δεδομένων σε σύγκριση με τη μετάδοση των δεδομένων με βάση ένα πρωτόκολλο προώθησης κίνησης μέσω ενδιάμεσης συσκευής. Με βάση ένα τέτοιο πρωτόκολλο, οι συσκευές με μικρή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων θα δεσμεύσουν ένα κανάλι για διάρκεια frame_size / (fast_data_rate = 11Mbps) αντί για frame_size / (slow_data_rate = 1Mbps), γεγονός που θα ωφελήσει άλλες συσκευές καθώς θα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα πρόσβασης στο κανάλι αυτό.

Ανεξάρτητα από το μηχανισμό επιλογής συσκευής προώθησης κίνησης, ένα από τα σημαντικά ζητήματα είναι η διαχείριση της συσκευής αυτής. Τα περισσότερα πρωτόκολλα MAC απαιτούν να έχουν μια εικόνα του τι συμβαίνει γύρω τους, κάτι που συνήθως υλοποιείται μέσω ενός πίνακα γειτόνων (neighbor table), στον οποίο ενδεχομένως να

υπάρχουν και εκτιμήσεις της ποιότητας των ζεύξεων και των δυνατοτήτων συνεργασίας. Ο μηχανισμός εύρεσης γειτόνων, είτε είναι παθητικός («ακούει») είτε είναι ενεργητικός (polling), οδηγεί στη δημιουργία λίστας προθυμίας. Δυστυχώς, ακόμη και αν μια συσκευή είναι σε θέση να συνεργαστεί, μπορεί να αρνηθεί μια τέτοια συνεργασία λόγω αλλαγών των συνθηκών του δικτύου κλπ. Επομένως, το πρωτόκολλο προώθησης κίνησης θα πρέπει να παρακολουθεί τις αλλαγές του δικτύου και να στηρίζεται πάνω σε σταθερές παραμέτρους.

Κεφάλαιο 3: Παράδειγμα προσομοίωσης μέσω του MATLAB-Simulink

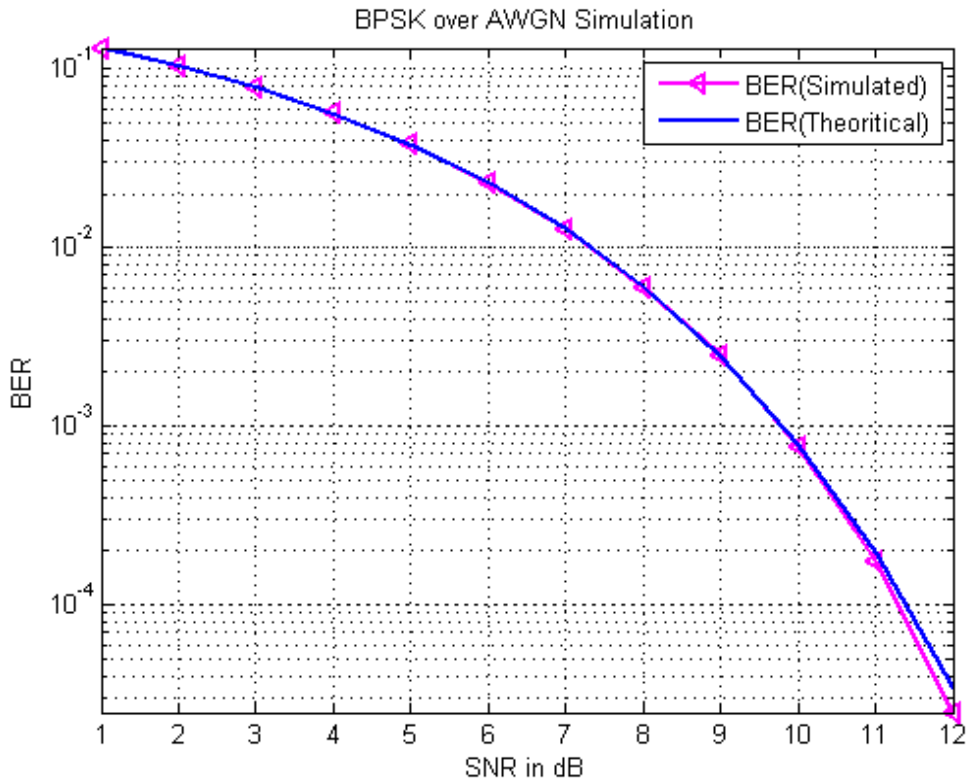
3.1 Εισαγωγή

Στο μέρος αυτό της μελέτης το οποίο τώρα ξεκινάμε θα έχουμε την ευκαιρία να δούμε κάποιον πειραματισμό ο οποίος θα πραγματοποιηθεί με το MATLAB. Αυτός ο πειραματισμός θα αφορά κάποιο ψηφιακό κύκλωμα τύπου relaying.

Το MATLAB, όπως γνωρίζουμε, είναι μία γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου που έχει ως βασικό της πεδίο εφαρμογών τα μαθηματικά[1]. Υπάρχει όμως παράλληλα δυνατότητα και χρήσης του MATLAB για δημιουργία προσομοιώσεων. Αυτό γίνεται με το πακέτο του Simulink το οποίο περιλαμβάνεται στις νεότερες εκδόσεις[2]. Συγκεκριμένα, για την μελέτη αυτή χρησιμοποιείται η έκδοση του 2011(7.12.0-R2011a).

Σκοπός αυτού του μέρους θα είναι λοιπόν να παρουσιάσει ένα συγκεκριμένο παράδειγμα προσομοίωσης ψηφιακών δικτύων και τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από το MATLAB-Simulink. Για να μπορέσει ο αναγνώστης όμως αυτής της μελέτης να παρακολουθήσει τα αποτελέσματα αυτά, καθώς και το ίδιο το παράδειγμα ευχερώς όσο και με ένα τρόπο σχετικά αυτοτελή αναφορικά προς το πρώτο μέρος, θεωρήθηκε σκοπιμο να γίνει μια ανάλυση και εκτενής αναφορά προς τις έννοιες τις οποίες θα συναντήσουμε στο συγκεκριμένο παράδειγμα προώθησης κίνησης δικτύων. Υπάρχουν αλληλεπικαλύψεις με το πρώτο μέρος, δηλαδή μπορεί κανείς να ανατρέξει σε ορισμένες από τις έννοιες που θα συναντήσουμε εκεί, άλλες όμως έννοιες θα έχουν σε αυτό το μέρος μια αποκλειστική αναφορά.

[1] “Matlab for engineers”, Holly Moore, 3rd ed., σελ. 1
[2] “Matlab for engineers”, Holly Moore, 3rd ed., σελ. 2



Παράδειγμα αποτελεσμάτων «τρεξίματος» προσομοίωσης με χρήση MATLAB R2011a(Simulink)

3.2 Εισαγωγικά για το παρουσιαζόμενο παράδειγμα

Το παράδειγμα το οποίο θα παρουσιάσουμε στο μέρος αυτό αφορά ένα κανάλι το οποίο θα έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Το κανάλι είναι τύπου «Rayleigh-fading»
- Το κανάλι είναι τύπου AWGN(Additive Gaussian White Noise)
- Η διαμόρφωση(modulation) του καναλιού είναι τύπου QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)
- Το πρωτόκολλο relaying που χρησιμοποιείται είναι τύπου “Amplify And Forward Relaying”(Ενίσχυσης και Προώθησης Κίνησης- AF Relaying)

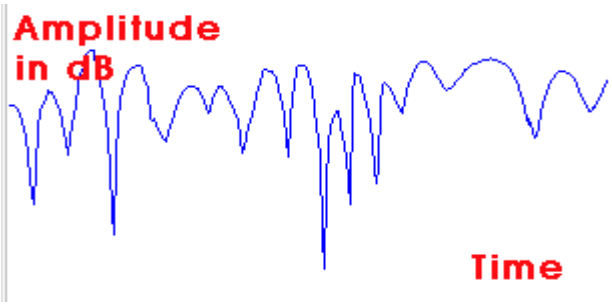
Έχει ήδη γίνει εκτενής ανάλυση σχετικά με το τι είναι το AF Relaying στην παρούσα εργασία ήδη στην παράγραφο 1.1. Πρόκειται άλλωστε για μια από τις βασικότερες μεθόδους προώθησης κίνησης. Έτσι, δεν θα αναφερθούμε σε αυτήν παρακάτω. Όμως, για να μπορέσει

ο αναγνώστης να έχει μια πλήρη κατανόηση των υπόλοιπων εννοιών που αναφέρονται, θα προταχθεί μια μελέτη αυτών.

Να σημειωθεί εδώ ότι για την επιλογή του συγκεκριμένου παραδείγματος που θα παρουσιαστεί έγινε ενδελεχής έρευνα ώστε να εκπροσωπεί το αντικείμενο με επάρκεια, καθώς και να εμφανίζει τα κατάλληλα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα κατά την παρουσίαση παραδειγμάτων προσομοιώσεων με το MATLAB αφορούν κάποια εκτίμηση σφαλμάτων (BER)[3]. Στην προκειμένη περίπτωση, τα αποτελέσματα αυτά θα αφορούν ειδικότερα την εκτίμηση που δίνει το MATLAB για το Symbol Error Rate(SER). Αυτό θα συναρτηθεί με τον θόρυβο του καναλιού, ένα κυμαινόμενο μέγεθος το οποίο αναπαρίσταται από το μέγεθος SNR(Signal to Noise Ratio-λόγος Σήματος προς Θόρυβο).

3.3 Τύπος καναλιού Rayleigh-fading

Το κανάλι τύπου Rayleigh-fading λαμβάνει την ονομασία αυτή από μια συγκεκριμένη κατανομή, την κατανομή Rayleigh.

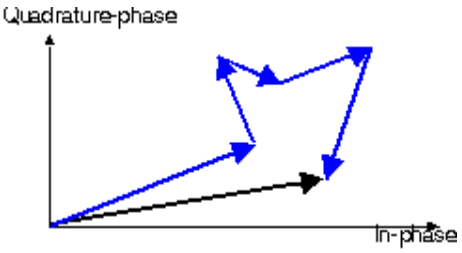


Παράδειγμα καναλιού "Rayleigh-fading"

Η κατανομή αυτή στην πραγματικότητα είναι μια εκτίμηση η οποία προκύπτει σε γενικές γραμμές από την εφαρμογή του Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος. Θεωρούμε ότι υπάρχει μια πηγή η οποία κατά την διάρκεια της μετάδοσης του σήματος μπορεί να έχει διάφορα αντικείμενα τα οποία παρεμβάλλονται και τα οποία να παράγουν φαινόμενα ανάκλασης ή ακόμη μπορεί η πηγή και ο προορισμός να βρίσκονται εν κινήσει, συνεπώς το τελικό σήμα

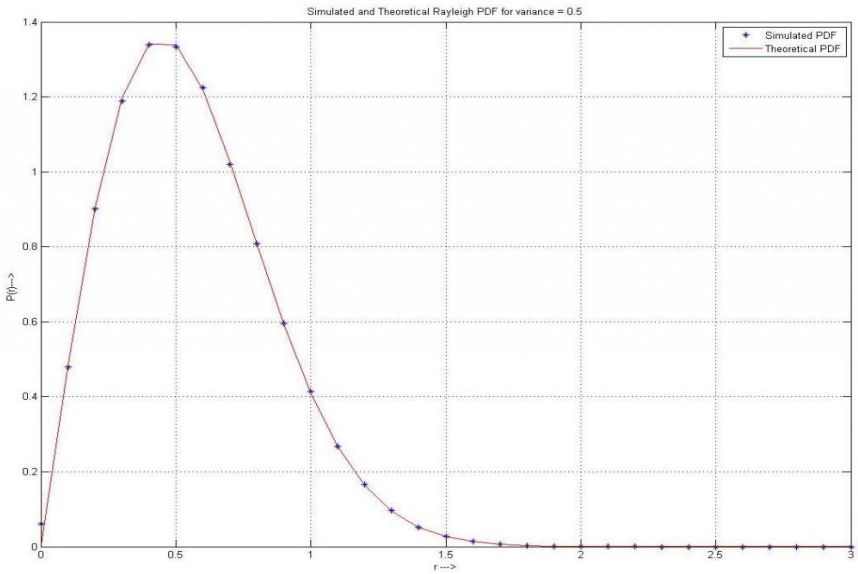
[3] Aniruddha Chandra, «Simulating Communication Systems with MATLAB : An Introduction»

είναι η σύνθεση ποικίλων σημάτων. Τα σήματα αυτά θεωρείται ότι συνιστούν τελικώς δύο βασικές συνιστώσες, την X(t) και Y(t), οι οποίες ακολουθούν την κατανομή του Gauss[4].



Αναπαράσταση της σύνθεσης του σήματος του Rayleigh-fading καναλιού(multipath channel)

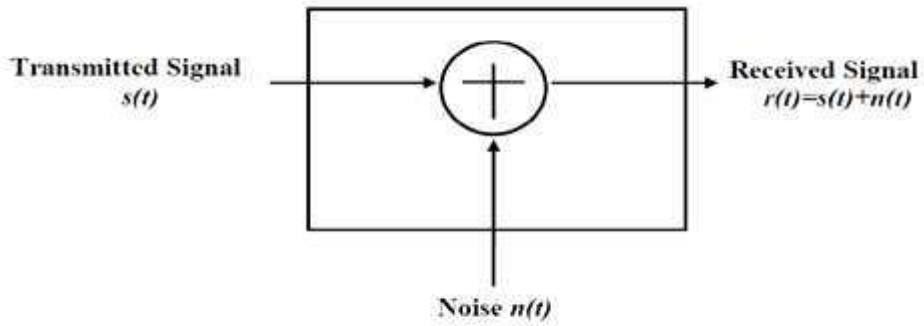
Η σύνθεση έτσι αυτών των δύο παράγει το μοντέλο του Rayleigh-fading καναλιού. Η στατιστική «κατανομή» αυτή δίνεται στην παρακάτω εικόνα.



3.4 Λευκός προσθετικός θόρυβος

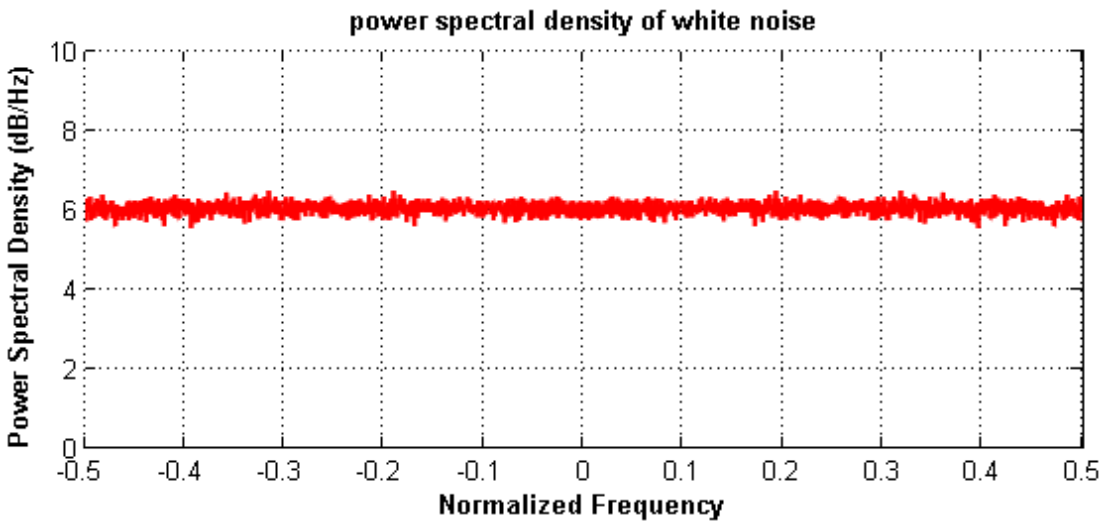
Το κανάλι που μελετάμε έχει το χαρακτηριστικό ότι είναι τύπου AWGN(Additive White Gaussian Noise), δηλαδή λευκού προσθετικού (Gaussian) θορύβου, όπως συνήθως λέγεται. Επειδή στο θεωρητικό μέρος της εργασίας γίνεται μόνο μια σύντομη αναφορά, θεωρούμε απαραίτητη για μια πλήρη εποπτεία να δοθούν ορισμένες βασικές λεπτομέρειες για την έννοια αυτή.

[4] http://www.gaussianwaves.com/2010/02/fading-channels-rayleigh-fading-2/



Ο θόρυβος, n(t) ως ένα επιπρόσθετο στοιχείο του σήματος- σχηματική παράσταση

Ο θόρυβος βέβαια είναι μια γενικότερη έννοια με την οποία δεν μπορούμε να ασχοληθούμε εδώ[5], διότι είναι εκτός του πεδίου που μελετάμε, αλλά για να έχουμε μια πλήρη κατανόηση του καναλιού μας, θα πρέπει να πούμε ότι ο θόρυβος είναι κάτι το επιπρόσθετο στο σήμα που φέρει το κανάλι, το οποίο διαφοροποιείται από το σήμα και δεν φέρει πληροφορία. Στο κανάλι του παραδείγματός μας, έχουμε ειδικότερα λευκό προσθετικό θόρυβο. Τι χαρακτηριστικά συνεπάγεται αυτό;



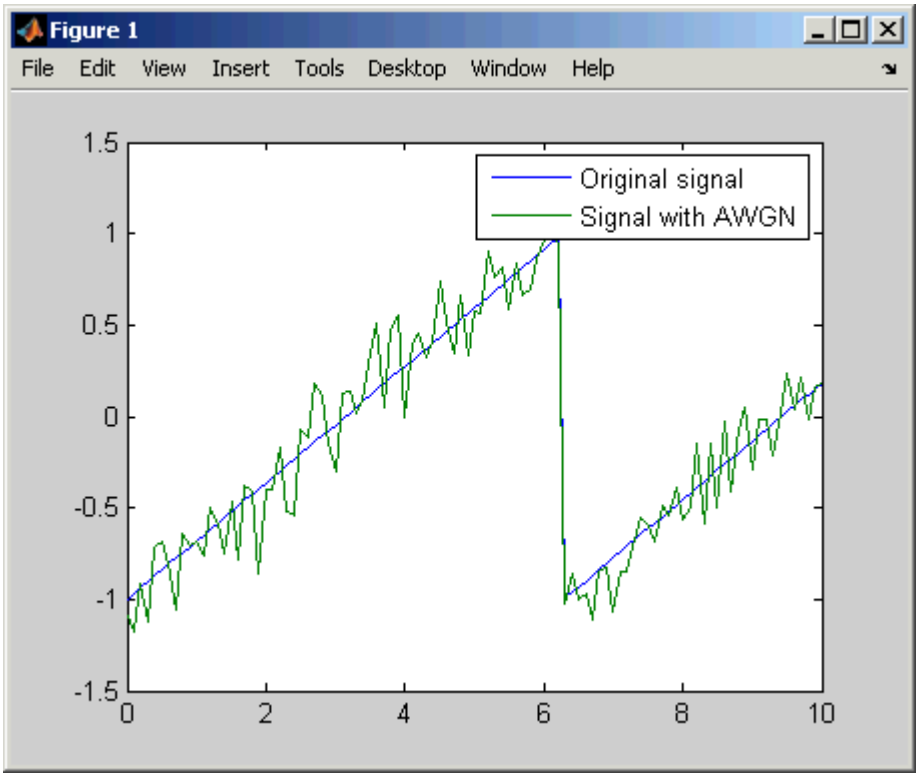
Πυκνότητα φάσματος ισχύος για είδος θορύβου που αποκαλείται «λευκός»

[5] https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/kef02.pdf

- Ο θόρυβος αυτός θεωρείται εξωτερικός και τιθέμενος πάνω από τον εσωτερικό θόρυβο, που τυχόν εγγενώς περιλαμβάνει το κανάλι. Έτσι, ο θόρυβος αυτός προστίθεται στο μεταδιδόμενο σήμα, ώστε να προκύψει το τελικό προσλαμβανόμενο σήμα[6]. Ο θόρυβος είναι στατιστικά/στοχαστικά ανεξάρτητος από το αρχικό σήμα[7].

- Παραμένει ίδιος για όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Η πυκνότητα φάσματος ισχύος[8] είναι επίπεδη, ενώ, όπως είναι επόμενο, η αυτοσυσχέτιση είναι μηδενική[9].

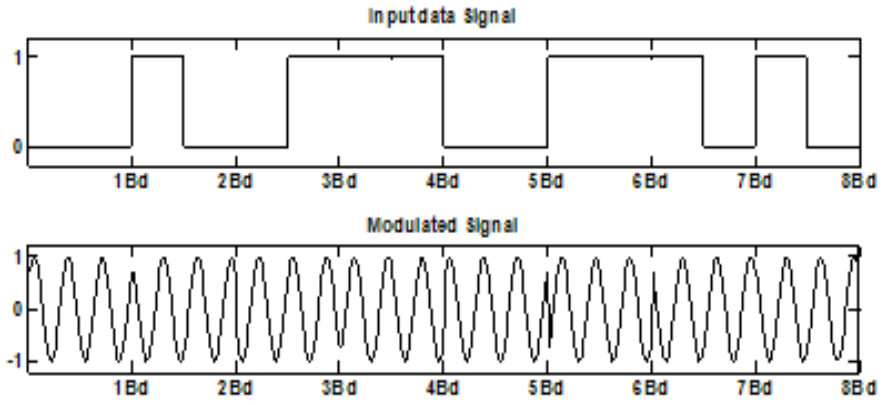
- Γκαουσιανός, τέλος, αποκαλείται, διότι έχει τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά: ακολουθεί την λεγόμενη κανονική κατανομή(κωδωνοειδής ως προς το σχήμα) ως προς τον χρόνο, ενώ η μέση τιμή είναι ίση με το μηδέν[10]. Στην παρακάτω εικόνα παρατηρείται το πώς επιδρά η «προσθήκη» του λευκού προσθετικού γκαουσιανού θορύβου στο αυθεντικό σήμα.



Output του MATLAB σε περίπτωση απλού σήματος και σήματος λευκού προσθετικού θορύβου

[6] http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/digimod/awgn.htm
[7] http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/36-220/lecture-5.pdf
[8] http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-011-introduction-to-communication-control-and-signal-processing-spring-2010/readings/MIT6_011S10_chap10.pdf
[9] http://www.researchgate.net/post/What_is_power_spectral_density2
[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Additive_white_Gaussian_noise

3.5 Τετραγωνική Διαμόρφωση Ολίσθησης Φάσης



Διαμόρφωση σήματος τύπου QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)

Η διαμόρφωση είναι μια διαδικασία η οποία συνδέεται άρρηκτα με ένα ψηφιακό κανάλι στο οποίο συμβαίνει προώθηση και ταυτόχρονα προστίθεται πληροφορία. Υπάρχει διαμόρφωση πλάτους, συχνότητας και φάσης.

Μία από τις πιο γνωστές και ταυτοχρόνως απλούστερες πρακτικές αυτού του είδους είναι αυτή η οποία αναλύεται στα προηγούμενα κεφάλαια και είναι η BPSK(Binary Phase Shift Keying). Σε εκείνη την περίπτωση, ήταν δυνατή η μεταβολή φάσης με τέτοιο τρόπο ώστε το ημίτονο του σήματος να μεταβληθεί σε συνημίτονο ή αντίστροφα.

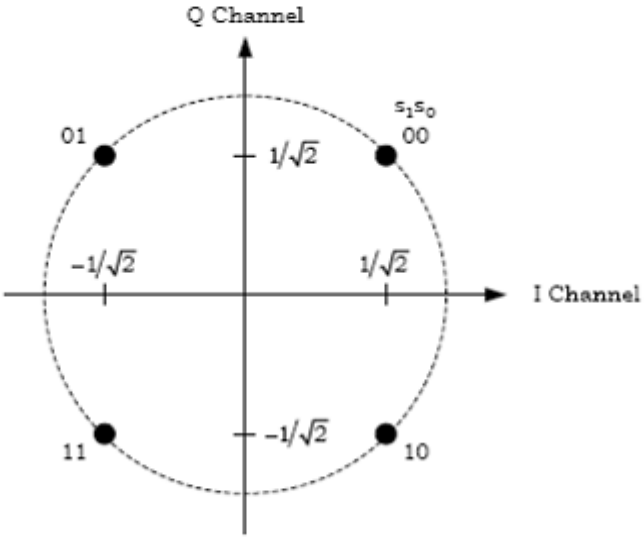
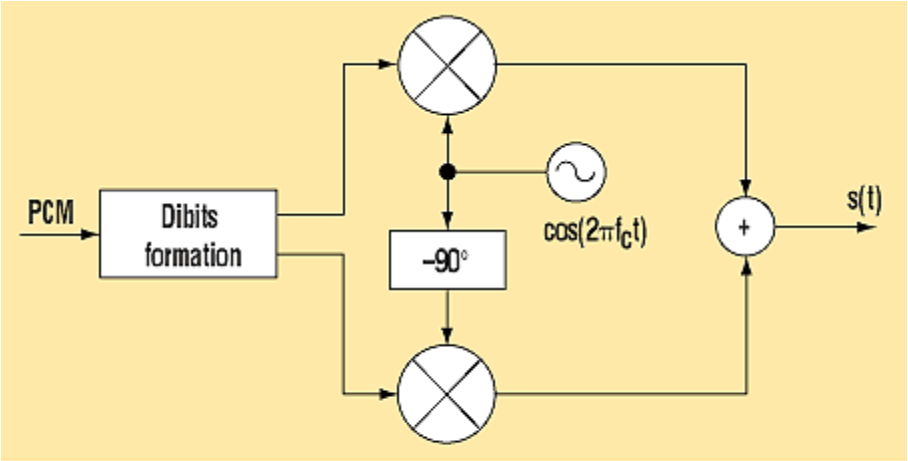


Figure 2.6.7.1-1. Signal Constellation for QPSK Modulation

Διάγραμμα τριγωνομετρικό που απεικονίζει τον τρόπο προσθήκης πληροφορίας σε ένα δεδομένο σήμα μέσω της διαμόρφωσης QPSK

Αυτές οι επισημάνσεις μας φέρνουν στην περίπτωση του δικού μας καναλιού, το οποίο είναι τύπου QPSK, δηλαδή τετραγωνικής διαμόρφωσης ολίσθησης φασης. Η ολίσθηση φάσης αυτού του τύπου δίνει την δυνατότητα προσθήκης περισσότερης πληροφορίας κατά την προώθηση του σήματος(πληροφορία δύο δυαδικών ψηφίων), εφόσον μπορεί να γίνει μετατροπή στην φάση του προσλαμβανόμενου σήματος κατά 45, 135, 225 και 315 μοίρες. Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε μια συνδεσμολογία που πραγματοποιεί αυτού του τύπου την ολίσθηση φάσης.

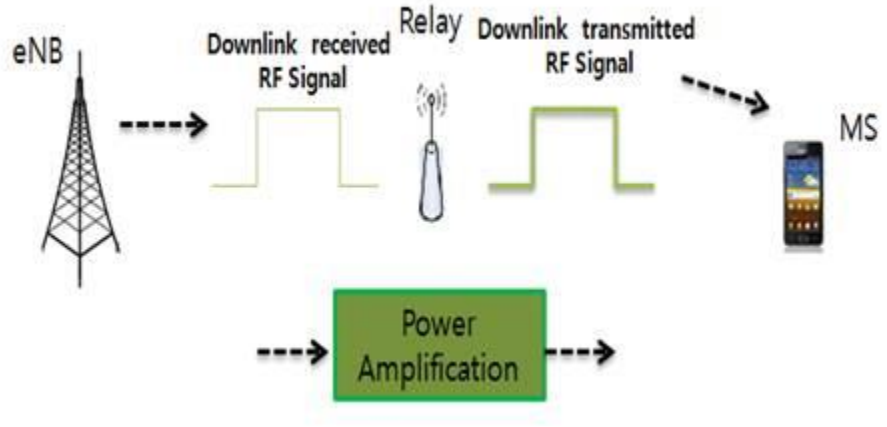


1. The classical method of implementing s(t) for a QPSK modulator is shown by this block diagram.

3.6 Λεπτομέρειες της παρουσιαζόμενης υλοποίησης

Το πρόγραμμα που θα παρουσιαστεί αφορά μια πρακτική υλοποίηση ενός καναλιού το οποίο λειτουργεί με βάση το συνεργατικό πρωτόκολλο relaying Ενίσχυσης/Προώθησης(cooperative amplify and forward relaying).

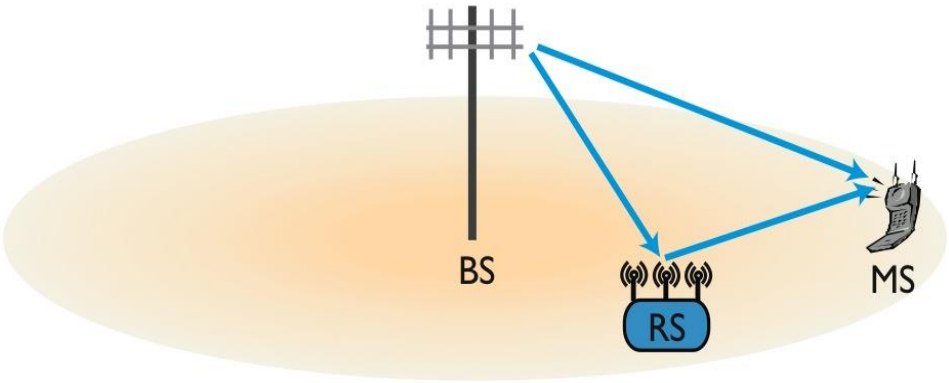
Τα πρωτόκολλα αυτά στα οποία ανήκει και το δεδομένο έχουν την στοχοθεσία και την δυνατότητα να ανήκουν και να συνιστούν θεμελιακό στοιχείο των μελλοντικών δικτύων και μάλιστα ασύρματων δικτύων. Ποιος ο λόγος που συμβαίνει αυτό; Επειδή έχουν την εγγενή δυνατότητα να μειώνουν σημαντικά τους λόγους και τις μετρικές των σφαλμάτων όπως η SER η οποία και θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό το αποτέλεσμα περιμένουμε να προκύψει και στις γραφικές παραστάσεις που θα μας δώσει το «τρέξιμο» με το MATLAB.



Amplify-And-Forward Relaying(μη-συνεργατικό) στην πραγματική ζωή

Εκτός όμως από το πρακτικό κύκλωμα που θα προσομοιωθεί, χρησιμοποιείται και ένα θεωρητικό δίκτυο το οποίο, επιπρόσθετα, βασίζεται στην σχετική βιβλιογραφία για τα συνεργατικά πρωτόκολλα relaying που έχουν σκοπούς επικοινωνίας.[11]

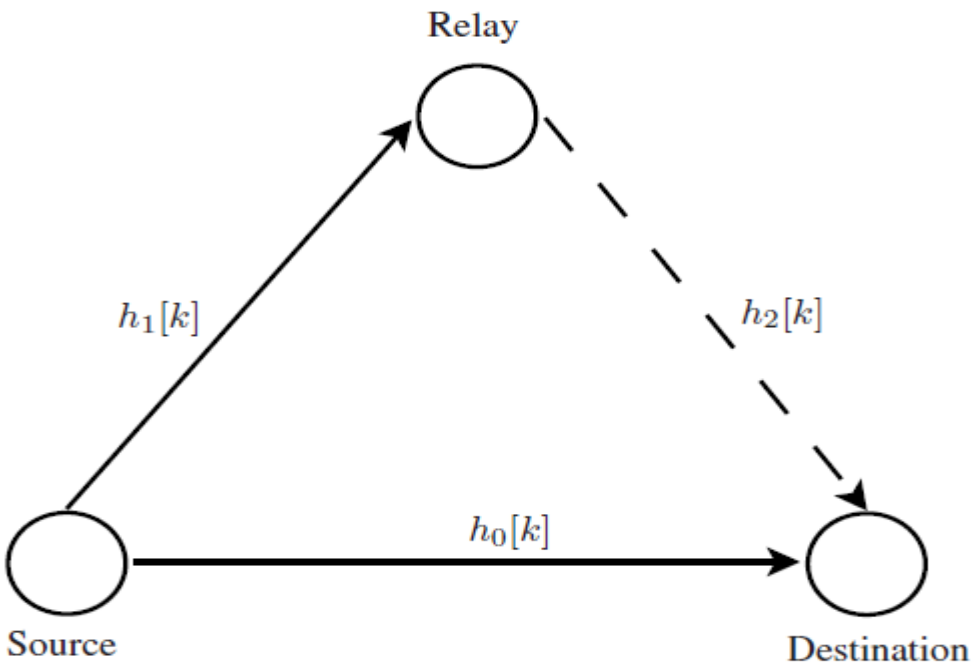
Κάποια πρόσθετα χαρακτηριστικά σε αυτά που αναφέραμε τα οποία περιλαμβάνονται στον κώδικα του παρουσιαζόμενου παραδείγματος και δεν συγκαταλέγονται σε αυτά που αναλύσαμε στις προηγούμενες παραγράφους του πρακτικού τμήματος είναι τα ακόλουθα:



Παράδειγμα δικτύου επικοινωνίας με ενδιάμεσο κόμβο(relaying station)

[11] Μια χαρακτηριστική περίπτωση που αναφέρεται σε πηγές έτσι, είναι τα νέα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τύπου 4G, που, όπως θα δούμε παρακάτω, έχουν αρκετά από τα χαρακτηριστικά του παραδείγματός μας

- Υπάρχει ένας σταθμός βάσης, από τον οποίο ξεκινάει η εκπομπή
- Υπάρχει ένας σταθμός προορισμού, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση, είναι κινητός
- Η διαδικασία της αποδιαμόρφωσης γίνεται, όπως είναι γνωστό, στον προορισμό(destination relay- mobile station-κινητός σταθμός)
- Ενδιάμεσα υφίσταται ένας σταθμός(relay station- rs), ο οποίος κάνει την προώθηση και ενίσχυση



Αναπαράσταση γενικής δομής παρουσιαζόμενου δικτύου

- Η ενίσχυση χαρακτηρίζεται και επικαθορίζεται από ένα παράγοντα ο οποίος αναφέρεται ως παράγοντας ενισχύσεως(amplification factor)
- Στον σταθμό βάσης υπάρχει, θα λέγαμε, η «γεννήτρια-πηγή» η οποία παράγει δεδομένα. Τα δεδομένα έχουν την μορφή πινάκων-γραμμών[12], ενώ συνολικά μεταδίδονται 10^6 στοιχεία

[12] Παράγονται στο MATLAB με την εντολή RANDOM με δύο ορίσματα

Όπως είναι γνωστό από την σχετική θεωρία και όπως αναφέραμε και παραπάνω, η αποκωδικοποίηση της πληροφορίας που μεταδίδει η αρχική πηγή γίνεται στον προορισμό. Αυτό προβλέπεται με τις κατάλληλες μαθηματικές παραστάσεις, στο σώμα του κώδικα του παραδείγματος που παρουσιάζεται.

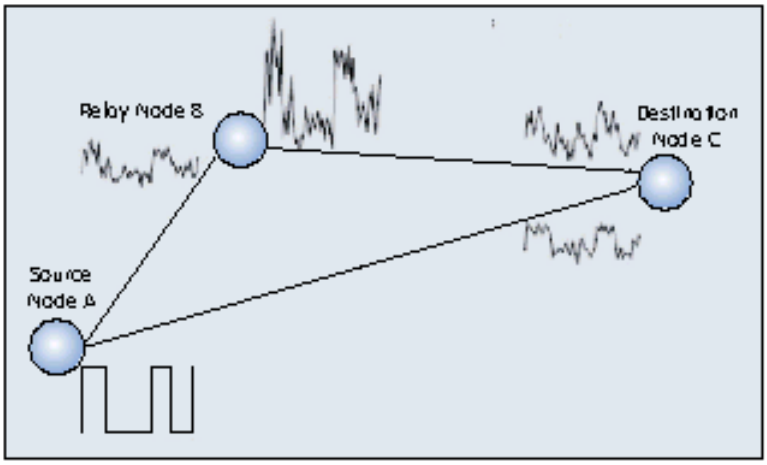


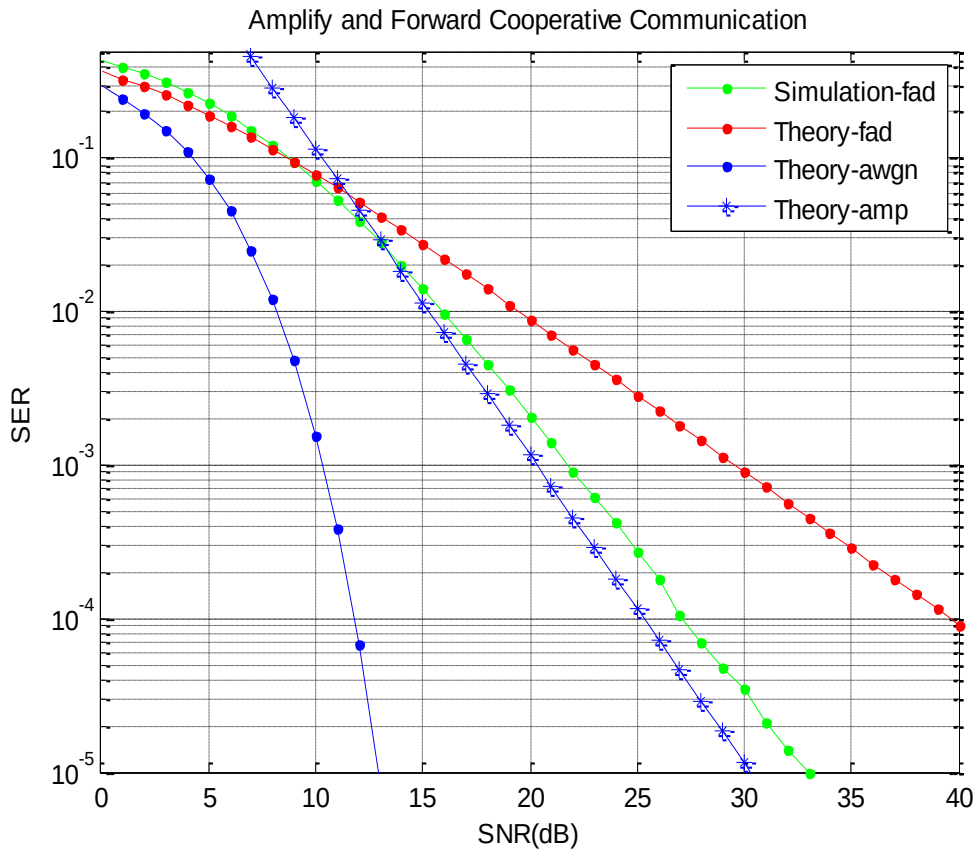
Figure 2. AF scheme.

Η πηγή (κόμβος Α) αρχικά εκπέμπει, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, δηλαδή στέλνει το κωδικοποιημένο σε κύμα-φορέα(carrier wave) σήμα *και* στους δύο κόμβους. Ο κόμβος Β και ο κόμβος του προορισμού λαμβάνουν τα δεδομένα. Ο κόμβος Β κάνει την διαδικασία της ενίσχυσης και προώθησης. Κατόπιν όλα τα δεδομένα συντίθενται(προστίθενται) και το αποτέλεσμα της σύνθεσης αποκωδικοποιείται. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Πρόκειται συγκεκριμένα για την αναπαράσταση του συνεργατικού πρωτοκόλλου που μας απασχολεί ειδικότερα.

3.7 Γραφική παράσταση BitErrorRate

Μετά από την ανάλυση που προηγήθηκε σε όλες τις παραπάνω παραγράφους, υπάρχει το κατάλληλο έδαφος, ώστε να παρατεθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το «τρέξιμο» του MATLAB.

Έτσι, στο γράφημα παρακάτω μπορούμε να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα του “plotting” που πραγματοποίησε το MATLAB για εμάς σε ένα κλασικό παράδειγμα AmplifyAndForwardRelaying:



Γραφική παράσταση αποτελεσμάτων MATLAB

Σημειώνουμε, για να γίνουν κατανοητά, ότι το SER αφορά το Bit Error Rate του Symbol Error Rate. Το μέγεθος αυτό συναρτάται, όπως συνηθίζεται καθώς έχουμε αναφέρει, με τον λόγο Σήματος προς Θόρυβο(Signal To Noise Ratio-SNR).

3.8 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα αυτά που προέκυψαν αφορούν, εκτός από την τεχνική amplify-and-forward(σηματοδοτείται από το 'amp') δύο συγκεκριμένες κατηγορίες καναλιών των οποίων τα χαρακτηριστικά αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Πρόκειται για τα εξής:

Κανάλι Rayleigh-fading. Σηματοδοτείται με το "fad" και πρόκειται για ένα τύπο καναλιού που ενσωματώνει την ύπαρξη του προβλήματος που πολύ συχνά μπορεί να υφίσταται με ένα κινητό σταθμό προορισμού. Το πρόβλημα αυτό είναι η ύπαρξη εμποδίων που κάνουν αναγκαία την έμμεση και όχι ευθεία μετάδοση του σήματος. Παρατηρείται ότι εδώ υπάρχει και μία καμπύλη προσομοίωσης(Simulation-fad)

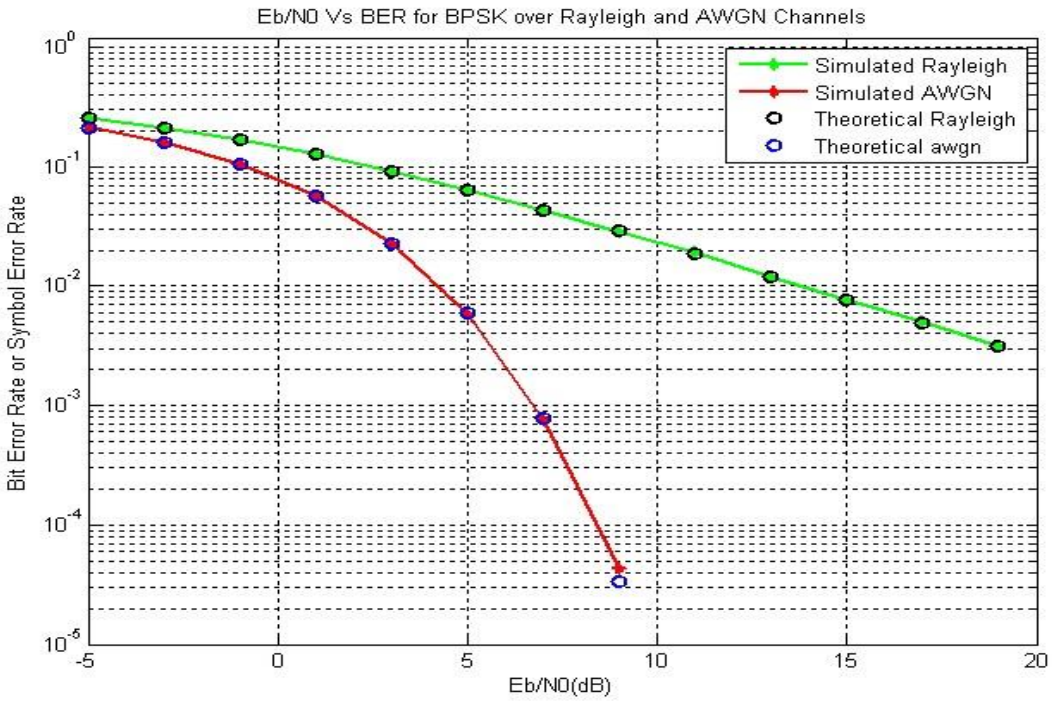
Κανάλι AWGN: πρόκειται για ένα κανάλι που διαθέτει θόρυβο(noise) ο οποίος βρίσκεται σε μία κανονικοποιημένη όμως, κωδωνοειδή, μορφή

Είναι χαρακτηριστική η αρκετά έως πολύ βελτιωμένη συμπεριφορά σε ό,τι αφορά τον δείκτη σφάλματος *SER* που δίνει το amplify and forward relaying σχετικά με το κανάλι Rayleigh-fading. Το κανάλι αυτό άλλωστε είναι περισσότερο ρεαλιστικό, ενώ το κανάλι AWGN είναι περισσότερο θεωρητικό, αν και βέβαια «κλασσικό» ως προς την χρήση του στην περίπτωση των ψηφιακών δικτύων.

Για να δώσουμε ένα παράδειγμα, μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα, ότι, όταν ο λόγος SNR=20, τότε υπάρχει περίπου η εξής εικόνα για τα υπόλοιπα κανάλια και το 'amp':

- Η τιμή του SER για το δίκτυο amplify/forward relaying είναι περίπου ίση με 10^{-3}.
- Η τιμή του SER για τα κανάλια τύπου 'fad' είναι αισθητά μεγαλύτερη του 10^{-3}, έως δέκα φορές μεγαλύτερη για την περίπτωση της θεωρητικής εκτίμησης!

Παρατηρείται ωστόσο ότι η τιμή για το κανάλι AWGN είναι αισθητά χαμηλότερη, δηλαδή καλύτερη, από όλα τα υπόλοιπα. Αυτό, όπως υπονοήθηκε και πρωτύτερα, είναι μόνιμο χαρακτηριστικό αυτού του καναλιού. Για λόγους αντιπαραβολής με μία άλλη προσομοίωση(με modulation τύπου BPSK), θα παραθέσουμε τα αποτελέσματά της σε επίπεδο γραφικής παράστασης, που μας οδηγούν στο ίδιο συμπέρασμα:



3.9 Επίλογος πρακτικού μέρους

Σε αυτό το μέρος μπορέσαμε να επικεντρώσουμε την προσοχή μας στην πρακτική, διαμέσου κατάλληλου λογισμικού, αποτύπωση της συμπεριφοράς της αντιμετώπισης του προβλήματος της επικοινωνίας, μέσω ενός από τα πιο γνώριμα και χαρακτηριστικά είδη relaying nodes, δηλαδή ενός κόμβου Amplify And Forward Relaying.

Η βιβλιογραφική ανάλυση και πραγμάτευση του θέματος που γίνεται υποδεικνύει με κάθε σαφήνεια ότι η λύση αυτή είναι αποτελεσματική και μάλιστα βέλτιστης απόδοσης. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από κατάλληλο πρόγραμμα φαίνεται ότι επικυρώνουν αυτήν την ανάλυση, μάλιστα με έναν τρόπο που είναι προφανής και θεαματικός.

Βιβλιογραφία

[1] Tauseef Jamal, Paulo Mendes (2014) “Cooperative Relaying for Wireless Local Area Networks”, Wireless Networking for Moving Objects, Springer International Publishing, pp 50-69, http://copelabs.ulusofona.pt/scicommons/index.php/attachments/single/657

[2] W. Elmenreich, N. Marchenko, H. Adam, C. Hofbauer, G. Brandner, C. Bettstetter, and M. Huemer (2008) “Building Blocks of Cooperative Relaying in Wireless Systems”, Electrical and Computer Engineering, Springer, 125(10):353–359, https://mobile.aau.at/~welmenre/papers/elmenreich-2008-building-blocks.pdf

[3] W. Stallings (2005) “Wireless Communication and Networks”, 2nd Edition, Pearson Prentice Hall, NJ, USA, https://sgar91.files.wordpress.com/2011/09/wireless-communication-and-networks-2nd-edition-william-stallings.pdf

[4] A. Nosratinia, T. Hunter, and A. Hedayat (2004) “Cooperative Communication in Wireless Networks”, IEEE Communications Magazine, 42:74–80, September 2004

[5] Jian Zhao (2010) “Analysis and Design of Communication Techniques in Spectrally Efficient Wireless Relaying Systems (Series in Wireless Communications)”, Logos Verlag Berlin GmbH, ISBN-10: 3832525858

[6] T. Cover and A. El Gamal (1979) “Capacity Theorems for the Relay Channel”, IEEE Transactions on Information Theory, IT-25:57284

[7] A. Ozgur, O. Leveque, and DL. Tse (2007) “Hierarchical Cooperation Achieves Optimal Capacity Scaling in Ad Hoc Networks”, IEEE Transactions on Information Theory, 53(10):3549–3572, https://web.stanford.edu/~dntse/papers/hierarchical_it.pdf

[8] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta (2005) “Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks”, IEEE Transactions on Information Theory, 51:3033–3063, http://cm.bell-labs.com/who/gkr/Papers/relaynetsIT05.pdf

[9] J. N. Laneman, D. N. Tse, and G. W. Wornell (2004) “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior”, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, https://web.stanford.edu/~dntse/papers/ltw2004.pdf

[10] Spalevic, P.; Stefanovic, M.; Panic, S.; Minic, S.; Spalevic, Lj (2012) “Amplify-and-Forward Relay Transmission System over Mixed Rayleigh and Hoyt Fading Channels”, Electronics & Electrical Engineering, Issue 120, p21, http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/viewFile/1445/1322

[11] I. Abou-Faycal and M. Médard (2004) “Optimal uncoded regeneration for binary antipodal signaling”, Proc. IEEE Intl. Conf. on Commun. (ICC), vol. 2, Paris, France, Jun.20–24, pp. 742–746, http://www.mit.edu/~medard/PID33351.pdf

[12] R. U. Nabar, H. Bölcskei, and F.W. Kneubühler (2004) “Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design,” IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 22, no. 6, pp. 1099–1109, http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.95.988&rep=rep1&type=pdf

[13] Sanguinetti, L., D'Amico, A.A., Yue Rong (2012) “A Tutorial on the Optimization of Amplify-and-Forward MIMO Relay Systems”, Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (Volume:30 , Issue: 8), pp. 1331 - 1346, http://arxiv.org/pdf/1303.2817.pdf

[14] I. Hammerstroem and A. Wittneben (2007) “Power allocation schemes for amplify-and-forward MIMO-OFDM relay links”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, no. 8, pp. 2798–2802, http://fit.hcmup.edu.vn/~haits/Conferences/ICCE%202010/Full%20Papers/SA/POWER%20ALLOCATION%20FOR%20AMPLIFY%20AND%20FORWARD%20MIMO-OFDM%20RELAY%20NETWORK.pdf

[15] Hyungsik Ju and Rui Zhang () “User Cooperation in Wireless Powered Communication Networks”, in Proc. IEEE Globecom, http://arxiv.org/pdf/1403.7123.pdf

[16] A. Stefanov and E. Erkip (2004) “Cooperative coding for wireless networks”, IEEE Trans.Commun., vol. 52, no. 9, pp. 1470–1476, http://eeweb.poly.edu/~elza/Publications/tcom04.pdf

[17] M. Janani, A. Hedayat, T. E. Hunter, and A. Nosratinia (2004) “Coded cooperation in wireless communications: Space-time transmission and iterative decoding”, IEEE Trans.Signal Process., vol. 52, no. 2, http://www.utdallas.edu/~aria/papers/sp03.pdf

[18] X. Bao and J. Li (2007) “Efficient message relaying for wireless user cooperation: decodeamplify-forward (DAF) and hybrid DAF and coded-cooperation”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, no. 11, pp. 3975–3984

[19] Yonghui Li, Vucetic, B., Wong, T.F., Dohler, M. (2006) “Distributed Turbo Coding With Soft Information Relaying in Multihop Relay Networks”, Selected Areas in Communications, IEEE Journal on (Volume:24 , Issue: 11), pp. 2040 - 2050, http://www.cel.usyd.edu.au/people/yonghui.li/UserFiles/File/publications/JSAC01%281%29.pdf

[20] T. Wang, A. Cano, G. Giannakis, and J. Laneman (2007) “High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays”, IEEE Trans. Commun., vol. 55, no. 7, pp. 1427–1436

[21] D. Chen and J. Laneman (2006) “Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 5, no. 7, p. 1785, https://www3.nd.edu/~jnl/pubs/twc2004a.pdf

[22] T.M. Cover and J. A. Thomas (2006) “Elements of Information Theory”, 2nd Edition, JohnWiley & Sons, http://coltech.vnu.edu.vn/~thainp/books/Wiley_-_2006_-_Elements_of_Information_Theory_2nd_Ed.pdf

[23] R. Pabst, B. H.Walke, D. C. Schultz, P. Herhold, H. Yanikomeroglu, and S. Mukherjee (2004) “Relaybased Deployment Concepts forWireless and Mobile Broadband Radio”, 42:80–89, http://www.comnets,rwth-aachen.de/PaWaWWRF2003.pdf

[24] T. Jamal, P. Mendes, and A. Zúquete (2012) “Wireless Cooperative Relaying Based on Opportunistic Relay Selection”, International Journal on Advances in Networks and Services, 05(2):116–127, http://www.thinkmind.org/netser_v5_n12_2012_11.pdf

[25] T. Jamal and P. Mendes (2014) “Cooperative Relaying in Dynamic Wireless Networks under Interference Conditions”, IEEE Communication Magazine, Special issue on User-centric Networking and Services, http://copelabs.ulusofona.pt/scicommons/index.php/attachments/single/719

[26] H. Shan, W. Zhuang, and Z. Wang (2009) “Distributed Cooperative MAC for Multi-hop Wireless Networks”, IEEE Communications Magazine, 47(2):126–133, http://bbcr.uwaterloo.ca/~wzhuang/papers/Com_Mag09_Hangguan.pdf

[27] E. W. Weisstein “Circle-Circle Intersection”, MathWorld–A Wolfram Web Resource, http://mathworld.wolfram.com/Circle-CircleIntersection.html

[28] H. Zhu and G. Cao (2006) “rDCF: A Relay-Enabled Medium Access Control Protocol for Wireless Ad Hoc Networks”, Mobile Computing, IEEE Transactions on (Volume:5, Issue: 9), pages 1201 - 1214, http://mcn.cse.psu.edu/paper/zhu/tmc06.pdf

[29] P. Liu, Z. Tao, S. Narayanan, T. Korakis, and S. Panwar (2007) “CoopMAC: A Cooperative MAC for Wireless LANs”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 25(2):340–354, http://catt.poly.edu/~panwar/publications/Implementing%20a%20Cooperative%20MAC%20Protocol%20for%20Wireless%20LANs.pdf

[30] K. Tan, Z. Wan, H. Zhu, and J. Andrian (2007) “CODE: Cooperative Medium Access for Multirate Wireless Ad Hoc Network”, Proc. IEEE of SECON, California, USA

[31] G. Bocherer and R. Mathar (2009) “On the Throughput/Bit-Cost Tradeoff in CSMA Based Cooperative Networks”, ITG Conference on Source and Channel Coding (SCC), http://arxiv.org/pdf/0906.1189.pdf

[32] S. Zou, B. Li, H. Wu, Q. Zhang, W. Zhu, and S. Cheng (2006) “A Relay-Aided Media Access (RAMA) Protocol in Multirate Wireless Networks”, Vehicular Technology, IEEE Transactions on (Volume:55, Issue:5), pages: 1657-1667, http://mnet.cs.nthu.edu.tw/paper/tmlin/061208.pdf

[33] L. Mei-Hsuan, S. Peter, and C. Tsuhan (2009) “Design, Implementation and Evaluation of an Efficient Opportunistic Retransmission Protocol”, IEEE MobiCom, Beijing, China, http://www.cse.ust.hk/~liu/dezun/group_meeting/2009.9/Opportunistic_Retransmission_mobicom267-lu.pdf

[34] S. Moh, C. Yu, S. Park, H. Kim, and J. Park (2007) “CD-MAC: Cooperative Diversity MAC for Robust Communication inWireless Ad Hoc Networks”, IEEE Conference on Communications, pages 3636–3641, Glasgow, Scotland, http://mnet.cs.nthu.edu.tw/paper/richard/071227.pdf

[35] L. M. Feeney, B. Cetin, D. Hollos, M. Kubisch, S. Mengesha, and H. Kar (2007) “Multi-rate Relaying for Performance Improvement in IEEE 802.11 WLANs”, WWIC, Coimbra, Portugal, https://www.sics.se/~lmfeeney/publications/Files/wwic07multirate.pdf

[36] H. S. Lichte, S. Valentin, H. Karl, L. Loyola, and J. Widmer (2008) “Design and Evaluation of a Routing-Informed Cooperative MAC Protocol for Ad Hoc Networks”, IEEE INFOCOM, Phoenix, USA,

[37] H. Adam, C. Bettstetter, and S. M. Senouci (2009) “Multi-Hop-Aware Cooperative Relaying”, IEEE VTC, Barcelona, Spain

[38] T. Jamal and P. Mendes (2013) “Analysis of Hybrid Relaying in Cooperative WLAN”, IFIP WirelessDays, Valencia, Spain, pages: 1 – 6

[39] Matthew S. Gast “802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide”, O'Reilly Media, 2nd Ed., 2005, ISBN-10: 0596100523, http://archive.oreilly.com/wireless/2003/08/08/wireless_throughput.html (Πρόσβαση στις 2 Απρίλη 2015)

[40] V. Angelakis, S. Papadakis, V.A. Siris, A. Traganitis, “Adjacent channel interference in 802.11a is harmful: Testbed validation of a simple quantification model”, Communications Magazine (IEEE) 49 (3), 2011, pp: 160–166, http://www.aueb.gr/users/vsiris/publications/p16_IEEECommMag_ACI_draft.pdf

[41] Rob Flickenger “Wireless Networking in the Developing World: A Practical Guide to Planning and Building”, Orange Grove Texts Plus, 2nd Ed., 2009, ISBN-10: 1616100877, http://wndw.net/pdf/wndw2-en/wndw2-ebook.pdf

[42] Wikipedia “IEEE 802.11n-2009”, http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11n-2009 (Πρόσβαση στις 2 Απρίλη 2015)

[43] “Matlab for engineers”, Holly Moore, 3rd ed., Prentice Hall

[44] “Simulating Communication Systems with MATLAB : An Introduction”, Aniruddha Chandra

[45] “Bit-Error-Rate Simulation Using Matlab”, James E. Gilley

[46] “Adaptive Modulation (QPSK, QAM)”, Rao Farhat Masood

[47] “A PRACTICAL FORWARDING SCHEME FOR WIRELESS RELAY CHANNELS BASED ON THE QUANTIZATION OF LOG-LIKELIHOOD RATIOS”, Stefan Schwandter and Gerald Matz

[48] “SER of Multiple Amplify-and-Forward Relays with Selection Diversity”, Phee Lep Yeoh et. al. Τοποθεσίες Ιστού(websites):

[49] ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/

[50] gaussianwaves.com/

[51] mathworks.com

[52] ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/

[53] researchgate.net/post/

[54] stat.cmu.edu/~cshalizi/

[55]wirelesscommunication.nl/